

Tuomas Tiihonen

# PARABOLISET KAUKALOKERÄIMET ENERGIANTUOTANNOSSA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Huhtikuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Tuomas Tiihonen: Paraboliset kaukalokeräimet energiantuotannossa (Parabolic trough collectors in energy production)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Konetekniikka

Huhtikuu 2019

---

Maailman nykyinen energiantuotanto perustuu pääosin uusiutumattomiin fossiilisiin polttoaineisiin, joiden käyttö aiheuttaa ongelmia ympäristölle ja ihmisille. Fossiilisten polttoaineiden saatavuus tulee heikentymään tulevaisuudessa, minkä vuoksi energiantuotantoon tullessa tarvitsemaan uusiutuvia energianlähteitä. Uusiutuvien energianlähteiden energia on pääosin peräisin auringosta ja niiden hyödyntäminen on huomattavasti ympäristöystävällisempää kuin fossiilisten polttoaineiden. Auringon säteily itsessään voidaan hyödyntää suoraan uusiutuvana energianlähteenä aurinkokeräimillä tai aurinkokennoilla. Tässä työssä käsitellään kirjallisuuslähteiden avulla aurinkokeräimiä, joista erityisesti keskitytään tutkimaan parabolisten kaukalokeräimien ominaisuuksia ja niiden tarjoamia mahdollisia käyttökohteita.

Aurinkokeräimien toiminta perustuu auringon säteilyenergian muuntamiseen lämpöenergiaksi, jota voidaan käyttää väliaineen avulla sähkön- tai lämmöntuotannossa. Työssä esitellään yleisimpien aurinkokeräimien rakennetta, käyttökohteita ja mahdollisia tulevia parannuksia. Parabolisia kaukalokeräimiä esitellään rakenteen ja käyttökohteiden osalta muita tarkemmin. Parabolisista kaukalokeräimistä esitellään myös lämpöhäviöitä, joiden huomioon ottaminen on varsin tärkeää keräintä suunniteltaessa. Lämpöhäviöihin liittyen toteutetaan laskujen avulla vertailu kahden erilaisen parabolisen kaukalokeräimen välillä.

Työn selvitysten perusteella aurinkokeräimien voidaan todeta olevan erinomaisia vaihtoehtoja energiantuotantoon muiden uusiutuvien energianlähteiden rinnalla. Niitä voidaan käyttää monipuolisesti niin kotitalouksissa lämpimän veden tuotannossa kuin suuressa kokoluokassa sähköntuotannossa. Parabolisten kaukalokeräimien voidaan taas todeta olevan edelleen yksi tärkeimmistä sähköntuotannossa käytettävistä keräintyypeistä. Tulevien parannusten avulla parabolisiin kaukalokeräimiin perustuvat voimalat kykenevät kilpailemaan fossiilisen sähköntuotannon kanssa yhä paremmin. Työssä suoritettujen laskujen ja vertailun perusteella voidaan lisäksi todeta, että parabolisen kaukalokeräimen lämpöhäviöt pienenevät käytettäessä tyhjiöitä vastaanotinta.

Avainsanat: parabolinen kaukalokeräin, aurinkokeräin, aurinkoenergia

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. AURINKOKERÄIMET YLEISESTI.....	3
2.1 Tasokeräimet .....	4
2.2 Paraboliset yhdistelmäkeräimet .....	8
2.3 Tyhjiöputkikeräimet .....	9
2.4 Lineaariset Fresnelin heijastinkeräimet .....	11
2.5 Paraboliset lautaskeräimet .....	12
2.6 Heliostaattikeräimet.....	14
3. PARABOLISET KAUKALOKERÄIMET .....	16
3.1 Keräimen rakenne.....	17
3.2 Keräimen lämpöhäviöt .....	20
3.3 Käyttösovellukset .....	23
4. PARABOLISEN KAUKALOKERÄIMEN LÄMPÖHÄVIÖIDEN VERTAILU.....	26
4.1 Laskentamenetelmät.....	26
4.2 Laskujen tulokset ja lämpöhäviöiden vertailu.....	27
5. YHTEENVETO.....	29
LÄHTEET .....	31
LIITE A: LÄHTÖTIEDOT LUVUN 4 LASKUIHIN	

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

CLFR	Kompakti lineaarinen Fresnelin heijastinkeräin
CPC	Parabolinen yhdistelmäkeräin
ETC	Tyhjiöputkikeräin
FPC	Tasokeräin
HFC	Heliostaattikeräin
HPC	Lämpöputkikeräin
LFR	Lineaarinen Fresnelin heijastinkeräin
PDR	Parabolinen lautaskeräin
PTC	Parabolinen kaukalokeräin
$\alpha$	Absorptiokerroin
$\beta$	Tilavuuden lämpötilakerroin
$\varepsilon$	Emissiviteetti
$\lambda$	Säteilyn aallonpituus
$\nu$	Kinemaattinen viskositeetti
$\rho$	Heijastuskerroin
$\sigma$	Stefanin-Boltzmannin vakio
$\tau$	Läpäisykerroin
$A$	Pinta-ala
$C$	Taulukkovakio
$D$	Sylinterin halkaisija
$E$	Kappaleen säteilyteho
$E_b$	Ideaalisen mustan kappaleen säteilyteho
$f$	Polttolinjan etäisyys paraabelin keskipisteestä
$F_{cyl}$	Yhdensuuntaisten sylinterien geometrinen kerroin
$g$	Putoamiskiihtyvyys
$G$	Auringon säteilyteho maan pinnalla
$h$	Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin
$k$	Lämmönjohtavuus
$L$	Pituus
$L_c$	Karakteristinen mitta
$m$	Taulukkovakio
$Nu$	Nusseltin luku
$Pr$	Prandtin luku
$\dot{Q}$	Lämpövirta
$r$	Sylinterin säde
$Ra$	Rayleighin luku
$Re$	Reynoldsin luku
$T$	Lämpötila
$V$	Nopeus
$x$	Koordinaatiston leveysakseli
$y$	Koordinaatiston korkeusakseli

# 1. JOHDANTO

Maailman tämänhetkinen energiantuotanto riippuu suurimmilta osin fossiilisista polttoaineista, joiden kiihtyvä käyttö lisää niin saasteita kuin kasvihuonekaasupäästöjä. Fossiilisten polttoaineiden aiheuttamat haitat näkyvät haposateina, savusumuna, ihmisten terveysongelmina sekä ilmaston lämpenemisenä. Polttoaineiden riittävyys on myös epävakaa pohjalla, sillä viimeisten öljy- ja maakaasuvarantojen on arvioitu loppuvan 60–80 vuoden kuluessa ja hiilivarantojen 250 vuoden kuluessa. Jotta fossiilisten polttoaineiden käyttöä saataisiin hillittyä, on joko kehitettävä hyötysuhteeltaan parempia energiantuotantomuotoja tai käytettävä täysin uusiutuvia energianlähteitä. Paremman hyötysuhteen energiantuotantomuodot eivät kuitenkaan poista fossiilisten polttoaineiden aiheuttamia haittoja, vaan vain vähentävät käytettävän polttoaineen tarvetta saman energiamäärän saamiseksi. Uusiutuvien energianlähteiden käytöstä sen sijaan koituu huomattavasti vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä tai saasteita. Uusiutuvilla energianlähteillä on myös mahdollista korvata fossiiliset energianlähteet täysin. (Çengel & Boles 2015, s. 2–7)

Energianlähde määritellään uusiutuvaksi, jos sen varannot ovat ehtymättömät ja sen käytöstä ei aiheudu ympäristölle ylimääräistä haittaa (Çengel & Boles 2015, s. 6). Käytettävissä oleviksi uusiutuviksi energianlähteiksi määritellään auringon säteily, vesivoima, tuulivoima, biomassa, geoterminen energia ja gravitaatiovoimiin perustuva vuorovesi. Niiden saatavuus on pääosin jakautunut epätasaisesti niin alueellisesti kuin ajallisesti, mikä aiheuttaa niiden käyttöön teknisiä ja taloudellisia haasteita. Uusiutuvat energianlähteet kattoivatkin vuonna 2010 vain 22,5 % maailman sähköntuotannosta. Uusiutuvia energianlähteitä käyttävät energiantuotantojärjestelmät kuitenkin kehittyvät jatkuvasti, jolloin niistä tulee taloudellisesti yhä kilpailukykyisempiä fossiilisia polttoaineita käyttäviin järjestelmiin verrattuna. (Kalogirou 2014, s. 1–15)

Uusiutuvista energianlähteistä tässä työssä keskitytään auringon säteilyn energian keräämiseen ja muuntamiseen käytettävään muotoon. Säteilyn energian suora kerääminen voidaan toteuttaa kahdella tavalla: käyttämällä aurinkokennoja tai aurinkokeräimiä. Näistä keskitytään aurinkokeräimien tarjoamiin nykyisiin ja tuleviin mahdollisuuksiin. Työssä tarkastellaan kirjallisuuslähteiden avulla yleisesti erilaisia aurinkokeräimiä sekä tarkemmin yhtä keräintyyppiä eli parabolisia kaukalokeräimiä.

Toisessa luvussa käsitellään aluksi teoriaa liittyen auringon säteilyyn ja sen käytön mahdollisuuksiin. Sen jälkeen luvussa esitellään erilaisten aurinkokeräimien tärkeimpiä ominaisuuksia ja osan kohdalla myös mahdollisia tulevia parannuksia kyseisiin teknologioihin. Kolmannessa luvussa esitellään aluksi parabolisia kaukalokeräimiä yleisesti, minkä jälkeen kerrotaan niiden rakenteesta, lämpöhäviöistä sekä käytännön käyttökohteista. Neljännessä luvussa selvitetään laskujen avulla kahden toisistaan poikkeavan parabolisen kaukalokeräimen vastaanottimen lämpöhäviöiden eroa. Viidennessä luvussa kootaan yhteen tärkeimmät havainnot aurinkokeräimistä sekä johtopäätökset.

## 2. AURINKOKERÄIMET YLEISESTI

Maan tärkein energianlähde aurinko tuottaa tehoa noin  $3,8 \cdot 10^{20}$  MW. Energia on peräisin auringossa tapahtuvasta fuusioreaktiosta, jossa kaksi kevyttä vetyatomia yhdistyvät yhdeksi heliumatomiksi. Fuusion seurauksena vapautuva energia jakaantuu auringon ympäristöön lämpösäteilyinä, jonka aallonpituus  $\lambda$  on pieni. Vain vähäinen osa säteilystä suuntautuu kohti Maata. Valonnopeudella liikkuva säteily saavuttaa Maan noin 8 minuutin ja 20 sekunnin kuluttua. Maan saavuttava säteilyteho on noin  $1,7 \cdot 10^{11}$  MW. (Kalogirou 2014, s. 1, 51) Kaikki Maata kohti tullut säteily ei kuitenkaan pääse Maan pinnalle, vaan osa siitä absorboituu ilmakehään tai heijastuu takaisin avaruuteen kaavan  $\alpha + \tau + \rho = 1$

(1)

mukaan, jossa  $\alpha$  on absorptiokerroin,  $\tau$  on läpäisykerroin ja  $\rho$  on heijastuskerroin (Çengel & Boles 2015, s. 10). Vain noin 51 % säteilystä pääsee maan pinnalle sisältäen suoraan ilmakehän läpäisseen säteilyn sekä ilmakehän partikkelien kautta taittuneen hajasäteilyn (Tian & Zhao 2013). Säteilyn teho on silti moninkertainen ihmiskunnan tehontarpeeseen verrattuna (Kalogirou 2014, s. 51).

Maan pinnalle asti pääsevän säteilyn energia on hyödynnettävissä suoraan joko lämmön- tai sähköntuotantoon sekä välillisesti tuuli- ja vesivoimana. Auringon tuottaman energian etuna muihin energiantuotantomenetelmiin nähden on sen puhtaus. Siinä missä fossiiliset polttoaineet energianlähteinä tuottavat ihmisille haitallisia pienhiukkasia, happamoittavia päästöjä sekä kasvihuonekaasuja, aurinkoenergia on täysin saastetonta. Aurinkoenergiaa on lisäksi saatavilla loputtomasti, toisin kuin fossiilisia polttoaineita. Sen negatiivisena puolena on kuitenkin pieni lämpövirta neliometriä kohti, keskimäärin vain noin  $950 \text{ W/m}^2$  selkeänä päivänä. Lisäksi lämpövirta vaihtelee suuresti leveyspiirin, sään, vuorokauden- ja vuodenajan mukaan. Energiantuotannossa tämä johtaa siihen, että säteilylle altistuvan alueen on oltava varsin suuri. Enimmillään jopa useita tuhansia neliömetrejä, jos halutaan saavuttaa suuria tehoja. Sähköntuotannossa voidaan käyttää valosähköiseen ilmiöön perustuvaa aurinkokennoteknologiaa tai aurinkokeräimiä lämpövoimakoneen lämmönlähteenä. Lämmöntuotannossa käytetään taas aurinkokeräimiä, joiden avulla voidaan tuottaa lämmintä vettä teollisuudelle tai kotitalouksien lämmitykseen, viilennykseen ja käyttövedeksi. (Çengel & Boles 2015, s. 9–10)

Aurinkokeräimien toiminta perustuu auringon säteilyn absorboimiseen selektiivisellä materiaalilla, jonka absorptiokerroin on pyritty saamaan mahdollisimman korkeaksi ja heijastuskerroin matalaksi. Selektiivisten materiaalien läpäisykerroin on yleensä nolla.

Näiden ominaisuuksien ansiosta säteily varastoituu materiaaliin lämpönä. Lämpö johdetaan keräimessä kiertävään lämmönsiirtonesteeseen ja siitä edelleen lämpövarastoon tai suoraan käyttöön. Myös pelkän kiertävän ilman lämmitys on mahdollista. Selektiivisen materiaalin lämmitessä se alkaa emittoida itsekkin lämpösäteilyä. Tätä pyritään ehkäisemään valmistamalla materiaali sellaiseksi, että sen emissiviteetti  $\varepsilon$  on mahdollisimman pieni. Emissiviteetti kuvaa sitä, kuinka lähellä materiaalin säteilyominaisuudet ovat ideaalista mustaa kappaletta. Se määritellään kaavan  $\varepsilon = E/E_b$  mukaan, jossa  $E$  on todellisen kappaleen säteilyteho tietyssä lämpötilassa ja  $E_b$  on ideaalisen mustan kappaleen säteilyteho samassa lämpötilassa. (Kalogirou 2014, s. 75–80, 125–130)

Aurinkokeräimet voidaan jakaa toimintatapansa mukaan kahteen luokkaan: auringon säteilyä keskittäviin ja ei-keskittäviin keräimiin (Tian & Zhao 2013). Näiden kahden luokan sisällä keräin toimii jollakin seuraavista kolmesta tavasta:

1. paikalleen kiinnitetyt keräimet
2. aurinkoa yhdellä vapausasteella seuraavat keräimet
3. aurinkoa kahdella vapausasteella seuraavat keräimet (Kalogirou 2014, s. 125).

Näistä paikalleen kiinnitettyihin keräimiin kuuluvat tasokeräimet (Flat-plate collector, FPC), paraboliset yhdistelmäkeräimet (Compound parabolic collector, CPC) ja tyhjiöputkikeräimet (Evacuated tube collector, ETC). Yhdellä vapausasteella liikkuvat keräimet seuraavat auringon liikettä joko pohjois-eteläsuunnassa tai länsi-itäsuunnassa. Näihin voivat kuulua paraboliset yhdistelmäkeräimet ja paraboliset kaukalokeräimet (Parabolic trough collector, PTC). Kahdella vapausasteella liikkuvat keräimet muuttavat suuntaustaan aurinkoon nähden siten, että ne ovat aina ideaalisessa kulmassa suurimman säteilymäärän heijastamiseksi ja parhaan optisen hyötysuhteen tuottamiseksi. Kahden vapausasteen seuranta käytetäänkin yleensä säteilyä keskittämissä keräimissä kuten CPC:ssä, PTC:ssä, lineaarisissa Fresnelin heijastinkeräimissä (Linear Fresnel reflector, LFR), parabolisissa lautaskeräimissä (Parabolic dish reflector, PDR) ja heliostaattikeräimissä (Heliostat field collector, HFC). (Kalogirou 2014, s. 125–153) Seuraavaksi esitellään näiden yleisimpien käytössä olevien keräimien toimintaperiaatteita ja ominaisuuksia, lukuun ottamatta parabolisia kaukalokeräimiä, joita käsitellään luvuissa 3 ja 4.

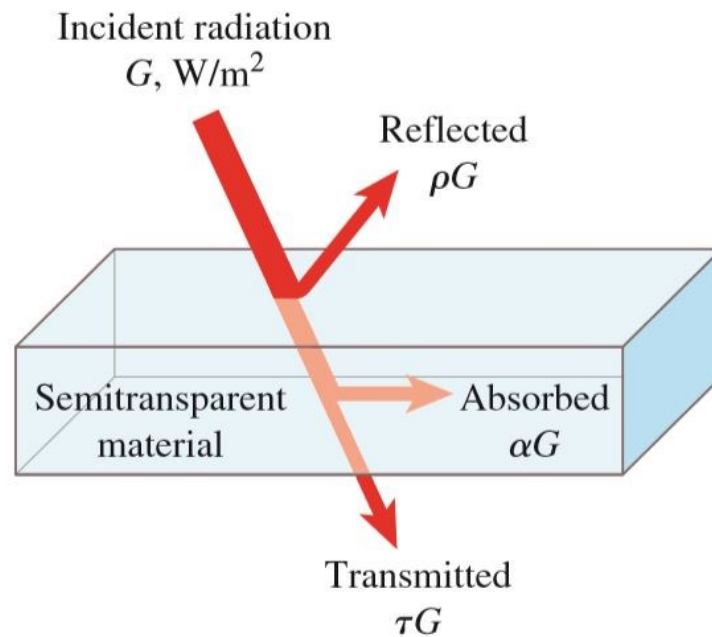
## 2.1 Tasokeräimet

Tasokeräin on nimensä mukaisesti tasainen, levyä muistuttava aurinkokeräin, joka ei keskitä auringon säteilyä. Se on yleensä kiinnitetty paikalleen, minkä johdosta sen suuntaus tulee olla asennusvaiheessa tarkoin mietitty. Rakenteeltaan tasokeräin koostuu neljästä pääosasta, jotka ovat pohjalta lähtien eristys, lämmönsiirtofluidin putket, absorptiolevy ja päällyslasi. Päällyslasi voi olla joko yksi- tai monikerroksinen sekä haluttaessa se



voidaan jättää kokonaan pois. Lasilla on kuitenkin keräimen toiminnan kannalta tärkeä tehtävä: se pienentää konvektion ja säteilyn kautta lasista poistuvaa lämpöä. (Tian & Zhao 2013) Se lisäksi suojaa absorptiopintoja epäpuhtauksilta ja kosteudelta, jotka saattaisivat vaikeuttaa säteilyn absorboitumista (Kalogirou 2014, s. 128).

Päällyslasina käytetään yleensä vain vähän rautaa sisältäviä laseja, jotka päästävät lävitseen lähes kaiken lyhytaaltoisen auringosta tulevan säteilyn, kuten kuvassa 1 on esitetty. Lasin tilalla on myös mahdollista käyttää joitakin muoveja, jos ne kestävät korkeita lämpötiloja ja UV-säteilyä. Normaalit ikkunalasit sisältävät yleensä liikaa rautaa käytettäväksi keräimissä, minkä vuoksi onkin käytettävä erikoislaseja. Erikoislasiin läpäisykerroin on noin 0,85–0,90. (Kalogirou 2014, s. 128–129) Ne ovat kuitenkin lähes läpäisemättömiä pidempiaaltoiselle ( $\lambda \geq 5,0 \mu\text{m}$ ) säteilylle, joka emittoituu absorptiolevystä sen lämmitessä (Tian & Zhao 2013). Lasikerroksen hyvä läpäisykyky lyhytaaltoiselle säteilylle verrattuna pieneen pidempiaaltoisen säteilyn läpäisykykyyn on yleisemmin tunnettu nimellä kasvihuoneilmiö (Kalogirou 2014, s. 126).



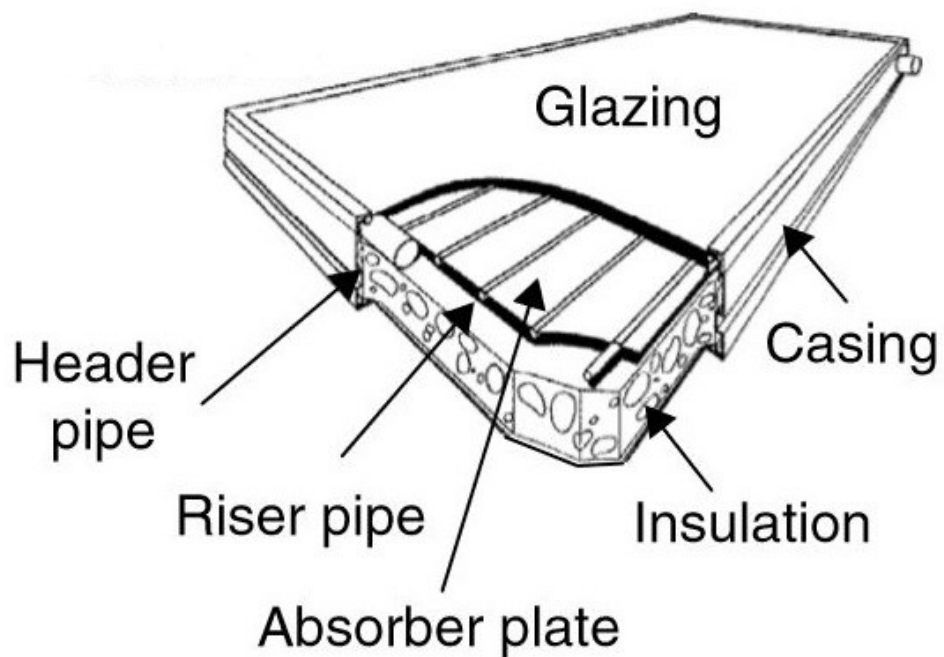
**Kuva 1.** Auringon säteilyn ( $G$ ) käyttäytyminen sen osuessa lasin pintaan (Çengel, Boles 2015, s. 10).

Kuvassa 1 esitetään auringon säteilyn (Incident radiation) kokema jakaantuminen sen osuessa läpinäkyvään pintaan (Semitransparent material) eli tasokeräimen tapauksessa päällyslasiin. Kaavan (1) mukaan osa säteilystä heijastuu lasin pinnasta poispäin (Reflected), absorboituu lasiin (Absorbed) tai läpäisee lasin (Transmitted).

Lasin ja absorptiopinnan välinen tila on yleensä täynnä liikkumatonta ilmaa, joka toimii eristeenä siirtäen varsin vähän lämpöä lasiin. Lämpöhäviöitä tapahtuu kuitenkin aina jonkin verran päällyslasin lämmitessä. Tällöin siitä siirtyy lämpöä ympäröivään väliaineeseen konvektiolla ja säteilyllä. (Kalogirou 2014, s. 132)

Lämmönsiirtofluidin putket sijaitsevat joko absorptiolevyssä tai heti sen alapuolella. Ne on yleensä valmistettu kuparista tai alumiinista hyvän lämmönjohtavuuden vuoksi. Pienemmän lämpötilan sovelluksissa absorptiolevy voi olla muovia, jolloin putket voidaan valmistaa osaksi sitä. Erillisten metalliputkien kanssa käytetään yleensä ripoja, joilla saadaan lämmönsiirtoon absorptiolevyn ja lämmönsiirtofluidin välille mahdollisimman suuri pinta-ala. Lämmönsiirtofluidin putket kulkevat levyn yläosasta suoraan alaosaan, jossa ne yhdistyvät kokoojaputkeen. Tätä on havainnollistettu kuvassa 2. Joissain keräimissä käytetään vain yhtä putkea, joka kulkee keräimen läpi serpentiinin muodossa. Tällä vältetään fluidivirran epätasainen jakautuminen ja keräimen ylikuumentuminen joissain osissa, mikä on mahdollista useamman putken keräimessä. Serpentiinin muotoinen putki tarvitsee kuitenkin pumpun kierrättämään fluidia, mitä ei välttämättä tarvita useamman putken keräimessä. (Kalogirou 2014, s. 125–133)

Lämmönsiirtofluidin putkien alle on sijoitettu eristekerros, jonka avulla ehkäistään lämmön johtumista pois putkista ja absorptiolevystä keräimen alapuolelta. Eriste voi olla valmistettu lasivillasta tai mineraalikuituvillasta. Lasivillan tapauksessa ei kuitenkaan voida käyttää talonrakennuksessa käytettyjä villamateriaaleja, sillä lämpötilan noustessa niiden sidosaineet saattavat höyrystyä keräimen päällyslasin sisäpuolelle vaikeuttaen säteilyn kulkeutumista absorptiolevylle. (Kalogirou 2014, s. 130–133)



**Kuva 2.** Lämpöleikkauskuva tasokeräimestä (Kalogirou 2014, s. 127).

Kuvassa 2 esitetään lämpöleikkaus tasokeräimestä. Nähtävissä ovat kokoojaputki (Header pipe), lämmönsiirtofluidin putket (Riser pipe), absorptiolevy (Absorber plate), eriste (Insulation), keräimen kehys (Casing) ja päällyslasi (Glazing).

Tasokeräimien lämmönsiirtofluidina käytetään yleensä vettä tai veden ja jäätymisenestoaineen sekoitusta (Kalogirou 2014, s. 127). Keräimien hyötysuhdetta on kuitenkin pyritty parantamaan nanofluidien avulla. Hyötysuhteen parannus perustuu fluidin nanopartikkelien suurempaan tiheyteen ja pienempään ominaislämpökapasiteettiin verrattuna veteen. Nanopartikkelien lämmönjohtavuus on lisäksi parempi kuin veden. Esimerkiksi kuparioksidia 3 % tilavuusvirrasta sisältävä lämmönsiirtofluidi voi pienentää tarvittavaa keräimen pinta-alaa 25,6 % verrattuna pelkän veden käyttöön. Keräimen alan pienentyessä myös sen valmistuskustannuksista tulee pienemmät, valmistuksesta aiheutuvia kasvihuonepäästöjä muodostuu vähemmän ja tuotteen takaisinmaksuaika asiakkaalle lyhenee. (Faizal et al. 2013)

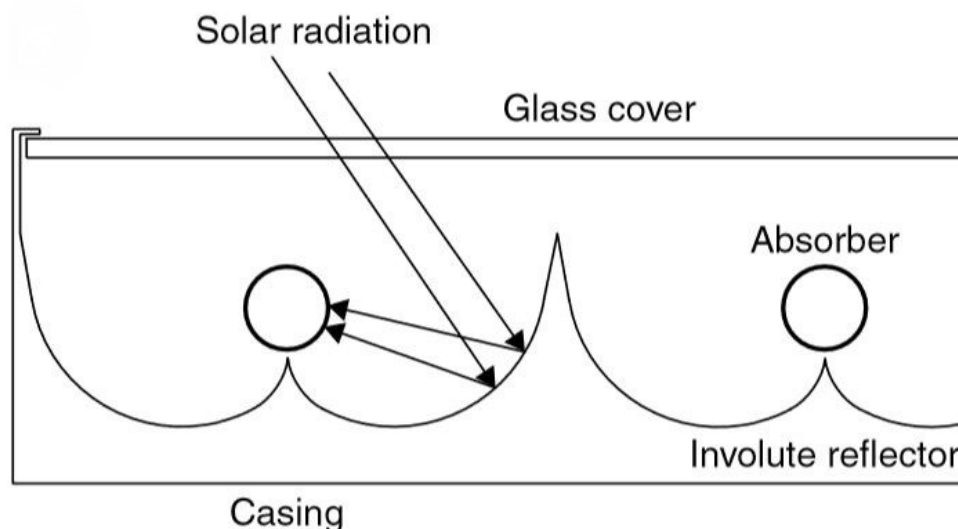
Lämpöä voidaan siirtää absorptiolevystä myös pelkkään ilmaan. Nesteisiin verrattuna ilmalla on kuitenkin pienemmät lämmönsiirtokertoimet. Tämän johdosta tietyn lämpö määrän siirtäminen ilmaan vaatii suuremman pinta-alan kuin saman määrän siirtäminen veteen käytettäessä yhtä suuria tilavuusvirtoja. Lämmönsiirron pinta-alaa ilmanavassa voidaankin kasvattaa käyttämällä erilaisia ripoja tai huokoista materiaalia, jolla on hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet. (Kalogirou 2014, s. 132) Sopianin et al. (1999) mukaan keräimen termistä hyötysuhdetta voidaan parantaa 20–70 % huokoisten materiaalien lisää-

misellä verrattaessa keräimeen, jonka ilmakehässä ei ole huokoista materiaalia. Kyseisessä tutkimuksessa huokoisena materiaalina oli käytetty teräsvillaa kaksikanavaisessa keräimessä.

## 2.2 Paraboliset yhdistelmäkeräimet

Parabolinen yhdistelmäkeräin on auringon säteilyä polttopisteeseen keskittävä keräin. Keskittävien keräimien yhteydessä on tarpeen ottaa käyttöön keskittämistä kuvaava suhdeluku. Se määritellään säteitä keskittävän pinta-alan suhteena absorptiopinnan alaan. Tasokeräimillä suhdeluku on siis 1. Parabolisen yhdistelmäkeräimen suhdeluku on 1–5. Keskittämistä kuvaavan suhdeluvun kasvaessa on myös mahdollista päästä suurempiin lämpötiloihin. Tämä johtuu keskittämisen aiheuttamasta lämpövirran kasvusta tiettyä pinta-alaa kohti. Siinä missä tasokeräimillä on mahdollista päästä 80 °C lämpötilaan, CPC-keräimellä voidaan päästä jopa 300 °C asti. (Kalogirou 2014, s. 126, 133–135)

Parabolinen yhdistelmäkeräin koostuu tärkeimmiltä osin kahdesta osasta: parabolinen säteilyä heijastava alue sekä absorptiopinta. Keräimen rakenne on esitetty kuvassa 3. Parabolinen alue kykenee heijastamaan absorptiopintaan kaiken sisään tulevan suoran säteilyn ja osan hajasäteilyä. Pienen keskittämiskyvyn vuoksi CPC-keräimien ei tarvitse välttämättä seurata auringon liikettä. Sen ansiosta seurantajärjestelmää ei tarvitse asentaa, mikä pienentää laitteen hankintakustannuksia. (Bellos et al. 2016) Haluttaessa, voidaan kuitenkin yhden vapausasteen seurannalla päästä noin 15 % parempaan termiseen hyötysuhteeseen verrattuna paikalleen kiinnitettyyn keräimeen (Kim et al. 2008).



**Kuva 3.** CPC -keräimen rakenne ja toiminta auringon säteilyn (Solar radiation) osuessa siihen (Kalogirou 2014, s. 135).

Kuvassa 3 esitetään läpileikkaus CPC-keräimestä, joka käsittää useamman parabolisen heijastimen ja absorptiopinnan asennettuna vierekkäin. Nähtävissä ovat paraboliseen muotoon taivutettu heijastinpinta (Involute reflector), absorptiopinta (Absorber), päällyslasi (Glass cover) ja keräimen kehys (Casing).

Parabolisen yhdistelmäkeräimen absorptiopinta voi olla kuvan 3 mukaan sylinterimäinen, mutta myös muut muodot ovat mahdollisia. Niitä ovat esimerkiksi tasainen pinta, pystysuora pinta tai kiilamainen pinta. Pinta on yleensä sijoitettu keräimen pohjalle, mutta tasainen pinta voidaan asentaa myös parabolisen osan reunalle. Tällöin se vastaanottaa keskitettyä säteilyä heijastimelta sekä suoraa säteilyä auringosta. (Kalogirou 2014, s. 134–135)

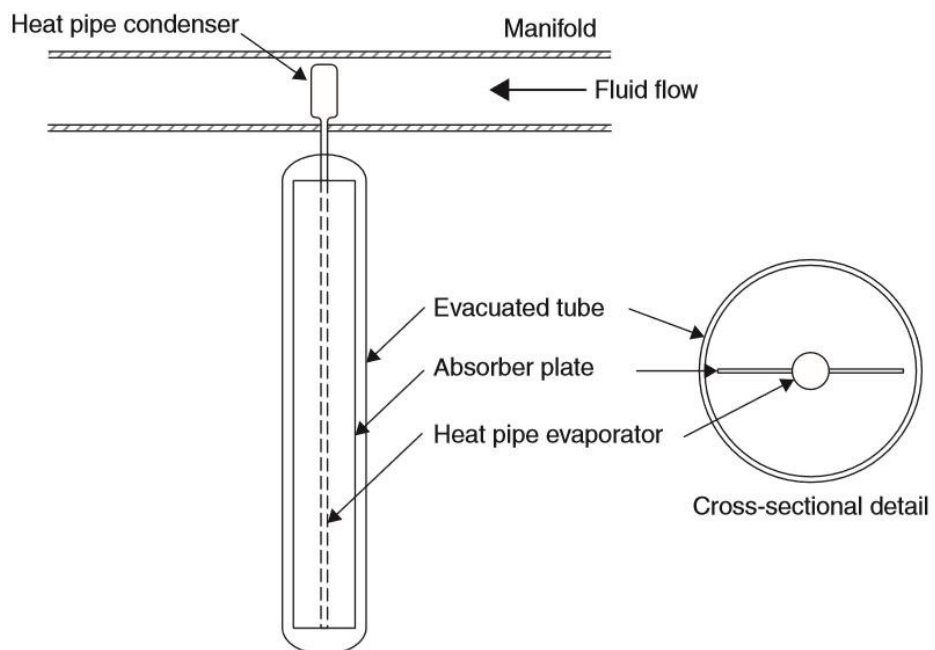
Tasokeräimeen verrattuna parabolisen yhdistelmäkeräimen sylinterimäinen, pienempi absorptiopinta tuo kahdenlaista etua: materiaalikustannukset laskevat ja konvektiohäviöt pienenevät. Konvektiohäviöiden vaikutus on erityisen pieni, jos absorptiopinnan päällä käytetään kahta lasikerrosta, joiden välissä on tyhjiö. (Kim et al. 2008)

## 2.3 Tyhjiöputkikeräimet

Tyhjiöputkikeräin toimii varsin samalla periaatteella kuin tasokeräin. Se ei keskitä auringon säteilyä vaan kerää absorptiopintaan osuvaa suoraa säteilyä tai hajasäteilyä. Keräin koostuu useasta tyhjiöksi imetystä lasiputkesta, joiden sisällä ovat absorptiopinta ja lämmönsiirtofluidin putket. Tasokeräimeen verrattuna sillä voidaan kuitenkin saavuttaa huomattavasti korkeampia lämpötiloja. Tämä johtuu lasiputken tyhjiöstä, joka pienentää konvektiivisia lämpöhäviöitä suuresti. Lämpöhäviöiden pienenemisen johdosta, korostuu

kuitenkin vaatimus tasaiselle lämmönsiirtofluidin tilavuusvirralle, jotta keräin ei kuumene sen valmistusmateriaalien sietorajoille. (Shafieian et al. 2018)

Tyhjiöputkikeräimen ylimääräinen lämpeneminen voi siis koitua ongelmaksi sen toiminnalle. Tätä on pyritty ehkäisemään valmistamalla niin sanottuja lämpöputkikeräimiä (Heat pipe collector, HPC). Lämpöputkikeräimen lasikehys on varsin samanlainen kuin tavallisen tyhjiöputkikeräimen ja sen absorptiopinta sijaitsee lasin sisällä. Ero tavalliseen tyhjiöputkikeräimeen on kuitenkin lämmönsiirrossa absorptiopinnalta pois. Siinä missä tavallinen tyhjiöputkikeräin siirtää lämmön suoraan lämmönsiirtofluidiin, lämpöputkikeräin siirtää sen faasimuutosmateriaaliin. Faasimuutosmateriaalista lämpö siirretään lämmönvaihtimen kautta lämmönsiirtofluidiin ja siitä edelleen käyttöön. (Shafieian et al. 2018) Lämpöputkikeräimen rakenne on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** Lämpöputkikeräimen rakenne. Vasemmalla läpileikkaus edestä ja oikealla läpileikkaus alta. (Kalogirou 2014, s. 137)

Kuvassa 4 nähtävissä ovat absorptiolevy (Absorber plate), lämpöputken höyrystin (Heat pipe evaporator), tyhjiöllinen lasiputki (Evacuated tube), lämpöputken lauhdutin (Heat pipe condenser), jakotukki (Manifold) ja lämmönsiirtofluidin virtaus (Fluid flow). Faasimuutosmateriaali on normaalitilassaan nesteenä, mutta sen sitoessa lämpöä absorptiopinnasta, se saavuttaa kylläisen tilan ja lopulta kaasuuntuu. Tiheyseron vaikutuksesta kaasu kohoaa lämpöputkessa lämmönvaihtimeen, jossa se lauhduu takaisin nesteeksi. Tästä neste siirtyy lämpöputken reunalla kulkevaa lankaa pitkin kapillaari-ilmiön johdosta takaisin sen pohjalle. Lämpöputken toimiessa oikein, faasimuutosmateriaali py-

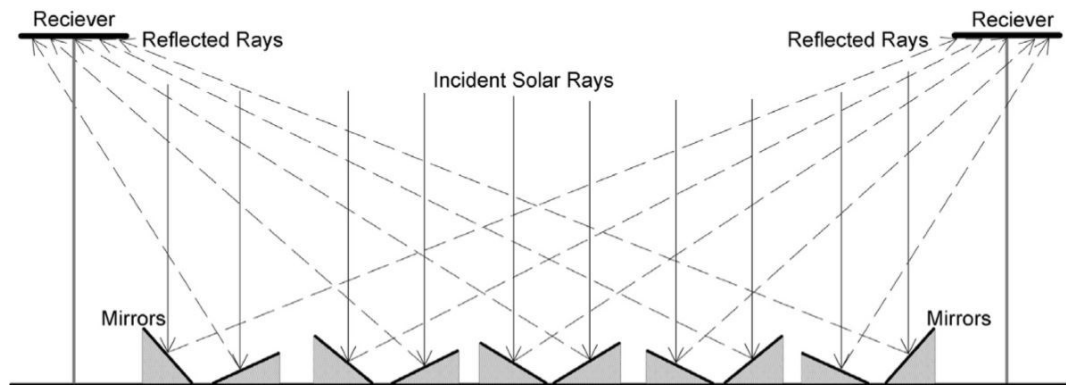
syttölee siis kylläisen tilan lähettyvillä jokaisessa toimintapisteessä. Lämpö ei tällöin varastoidu tuntuvana vaan latenttina. Tämän ansiosta lämpöputken lämpötila pysyy verrattain vakiona, riippumatta auringon säteilyvoimakkuuden tai lämmönsiirtofluidin tilavuusvirran vaihteluista. (Shafieian et al. 2018)

## 2.4 Lineaariset Fresnelin heijastinkeräimet

Lineaariset Fresnelin heijastinkeräimet pyrkivät toimimaan paraabelin tavoin, heijastaen auringon säteilyä tiettyyn pisteeseen peileillä. Keskittämistä kuvaava suhdeluku niille on heijastimien määrästä riippuen 10–40. Ero parabolisiin keräimiin on heijastustavassa. Fresnelin heijastimet eivät vaadi kaarevaa pintaa vaan ne voivat olla täysin suoria. Tämän johdosta voidaan säästää materiaalikuluissa, sillä parabolisten heijastimien valmistaminen on kalliimpaa Fresnelin heijastimiin verrattuna. Heijastimet voidaan sijoittaa tasaiselle maalle ja varustaa joko yhden tai kahden vapausasteen seurannalla. Nimensä mukaisesti heijastimet asennetaan lineaarisiin riveihin siten, että niiden heijastamat säteet osuvat korkealle nostettuun vastaanottimeen. Vastaanottimessa absorptiopinta sitoo säteilyn energian ja välittää sen lämmönsiirtofluidille. Keräimillä voidaan näin tuottaa lämpöä sähköntuotantoon. Käytettäessä useamman vastaanottimen rivejä voidaan saavuttaa jopa megawattiluokan tehoja. (Kalogirou 2014, s. 126, 148–150)

Lineaaristen rivien ongelmana on kuitenkin se, että joillain auringon säteilyn kulmilla, rivin etummaisat heijastimet aiheuttavat varjon takana oleville tai estävät niistä heijastuneen säteilyn kulkeutumisen vastaanottimeen. Tällöin taaempien heijastimien käyttö estyy osittain tai kokonaan, minkä johdosta keräimien täyttä potentiaalia ei saada hyödynnettyä. Ongelmaan on kuitenkin pyritty löytämään ratkaisu esimerkiksi kasvattamalla vastaanottimen korkeutta, jolloin suuremmalla osalla heijastimista olisi täysi näkyvyys siihen. Korkeuden kasvattaminen tuo kuitenkin mukanaan lisää rakennuskustannuksia ja haasteita tuulen aiheuttamien kuormitusvoimien johdosta. (Zhu & Chen 2018)

Toinen ratkaisu ongelmaan on niin sanottu kompakti lineaarinen Fresnelin heijastinkeräin (Compact linear Fresnel reflector, CLFR). Keräin hyödyntää kahden toisiaan lähkekkäin olevan vastaanottimen heijastimia varjostuksen ehkäisemiseksi ja mahdollisimman tehokkaan maankäytön aikaansaamiseksi. Sen toiminta perustuu mahdollisuuteen säätää heijastimien kohdevastaanotinta, jolloin mahdollinen varjoon jäävä heijastin voidaan kääntää heijastamaan viereiseen vastaanottimeen ja näin saada varjostus poistumaan. (Zhu & Chen 2018) Kompaktin lineaarisen heijastinkeräimen toiminta on esitetty kuvassa 5.



**Kuva 5.** Kompaktin lineaarisen Fresnelin heijastinkeräimen peruseriaate (Zhu, Chen 2018, s. 241).

Kuvassa 5 esitetään auringon säteilyn (Incident Solar Rays) heijastuminen (Reflected Rays) peileistä (Mirrors) vastaanottimen (Receiver) absorptiopintaan. Useamman peilin heijastaessa säteensä yhteen vastaanottimeen saavutetaan suurempi keskittämisen suhdeluku ja tätä kautta suurempi lämpövirta. Lineaarisen Fresnelin heijastinkeräimen toimintalämpötila onkin mahdollista saada jopa 250 °C asti. (Kalogirou 2014, s. 126, 148–150)

## 2.5 Paraboliset lautaskeräimet

Parabolisen lautaskeräimen toiminta perustuu muiden parabolisten keräimien tavoin auringon säteiden keskittämiseen polttopisteeseen. Se koostuu satelliittilautasen muotoisesta heijastinosasta, jonka polttopisteeseen on asennettu vastaanotin. Keräimen halkaisija on 5–15 metriä. Sen on mahdollista toimia vain kahden vapausasteen seurannalla, minkä vuoksi se hyödyntää saatavilla olevan säteilyn energiaa täydellä potentiaallilla. Lautaskeräimen keskittämisen suhdeluku voi olla 600–2000, minkä ansiosta vastaanottimen lämpötila voi kohota jopa 1500 °C asti. Keräimen lämpöteholla voidaan tuottaa lämpöä erilaisille teollisuuden prosesseille, mutta yleisimmin keräimiä käytetään sähköntuotannossa. (Kalogirou 2014, s. 126, 150–151, 557–559)

Sähköntuotannossa keräin voi toimia yksittäin tai niitä voidaan yhdistää useampia. Useamman keräimen voimalassa keräimet tuottavat höyryä yhteiselle turbiinille, joka muuntaa höyryn termisen energian generaattorin kautta sähköksi. Tällöin keräimen vastaanottimessa kiertää lämmönsiirtofluidi. Kyseisessä toimintatavassa on kuitenkin ongelmansa: suuren kokoluokan voimalassa lämmönsiirtofluidin pumppauskustannukset ja fluidin siirtoputkien lämpöhäviöt kasvavat. Tätä voidaankin pyrkiä ehkäisemään käyttämällä keräimiä erillisinä sähköntuotannon yksikköinä. (Kalogirou 2014, s. 150–151, 557–559)



Yksittäinen lautaskeräin voi tuottaa mekaanista työtä sähkögeneraattorille esimerkiksi Brayton-prosessilla tai Stirling-moottorilla. Tällöin keräimelle ei tarvitse asentaa erillisiä lämmönsiirtofluidin putkia. (Kalogirou 2014, s. 557) Brayton-prosessin toiminta perustuu keräintä ympäröivän viileän ilman puristamiseen kompressorilla suureen paineeseen, minkä jälkeen siihen tuodaan keräimen tuottamaa lämpöä. Kuumentunut ilma ajetaan turbiinin läpi, jossa se paisuessaan tuottaa mekaanista työtä (Malali et al. 2017). Stirling-moottorin toiminta taas perustuu kaasun tilavuuden muutokseen eri lämpötiloissa. Kaasuna käytetään yleisimmin heliumia. Stirling-moottorilla varustettu 10 kW Eurodish-lautaskeräin on esitetty kuvassa 6. (Killian & Ebrary 2009, s. 7)



**Kuva 6.** Sähköä Stirling-moottorilla tuottava Eurodish -lautaskeräin (Killian & Ebrary 2009, s. 7).

Vaikka parabolisen lautaskeräimen sähköteho on suurimmillaan 25 kW, tehon tuotto voi kuitenkin ajoittua vain auringon paisteen ajalle. Yksittäisen sähköä tuottavan keräimen lämpöä ei voida myöskään varastoida. Hetkinä, jolloin auringon säteilyä ei ole saatavilla, onkin mahdollista käyttää sähköntuotantoprosessin lämmönlähteenä fossiilista polttoainetta käyttävää järjestelmää. (Kalogirou 2014, s. 558–559)

## 2.6 Heliostaattikeräimet

Heliostaattikeräimet, toiselta nimeltään keskitetyn vastaanottimen keräimet, ovat suurimman kokoluokan aurinkokeräimiä. Niitä käytetään yksinomaan sähköntuotannossa, pääosin huomattavasti suuremmassa mittakaavassa kuin muita aurinkokeräimiä. Keskitetyn vastaanottimen järjestelmä koostuu viidestä pääosasta: heliostaatit, vastaanotin, lämmönsiirtojärjestelmä, lämpövarasto ja ohjausjärjestelmä. Näistä heliostaatit ovat aurinkoa kahdella vapausasteella seuraavia suurikokoisia tasapintaisia peilejä. Yhden heliostaatin pinta-ala vaihtelee muutamasta neliömetristä yli sataan neliömetriin. Jokainen heliostaatti heijastaa auringon säteilyn korkeaan torniin sijoitettuun vastaanottimeen. Heliostaatteja, torni ja vastaanotin on esitetty kuvassa 7. Suuren lämpövirran saavuttamiseksi yhdessä voimalassa käytetään tuhansia heliostaatteja. Tämän vuoksi keskittämistä kuvaava suhdeluku on varsin suuri, jopa 300–1500. (Kalogirou 2014, s. 152, 551–557)



**Kuva 7.** Saksassa sijaitseva 1,5 MW keskitetyn vastaanottimen voimala (Kalogirou 2014, s. 555).

Keräinjärjestelmän vastaanotin sijaitsee useiden kymmenien metrien korkeudella. Se voi olla muodoltaan joko sylinterimäinen tai onkalomainen. Sylinterimäistä vastaanotinta käytetään yleensä suuremmille voimaloille, sillä siihen voidaan heijastaa säteilyä sen kaikilta puolilta. Kyseinen vastaanotin sopii erityisesti voimaloille, joiden sähköntuotanto

perustuu Rankine-prosessiin. Onkalomainen vastaanotin voi taas vastaanottaa säteilyä vain tietyltä edessään olevalta sektorilta. Sitä käytetään Brayton-prosessiin pohjautuvissa voimaloissa. (Kalogirou 2014, s. 551–553)

Rankine-prosessin voimaloissa vastaanottimessa voi kiertää joko ilma, vesi tai sula suolaseos. Siirrettäessä lämpö absorptiopinnoista ilmaan, lämmönsiirtopintoina käytetään huokoisia materiaaleja, jolloin lämmönsiirto tehostuu. Kuumentuneella ilmalla taas höyrytetään lämmönsiirtimessä vesi, joka vesihöyrynä pyörittää höyryturbiinia. Käytettäessä vettä lämmönsiirtofluidina vastaanottimessa, se voidaan höyrystää suoraan ja kierrättää höyryturbiiniin. (Kalogirou 2014, s. 551–555)

Jotta voimala voisi jatkaa toimintaansa pilvisellä säällä tai öisin, pitäisi lämpöä pystyä varastoimaan auringon paisteen aikana. Pelkkää vettä tai ilmaa lämmönsiirtofluideina käytettäessä se ei ole kuitenkaan mahdollista. Ratkaisuna voidaankin käyttää sulaa suolaa. Voimalan toiminta perustuu tällöin suolan kierrättämiseen ensin vastaanottimessa, jossa se kuumenee yli 500 °C lämpötilaan. Sen jälkeen suola siirtyy säilytystankkeihin, joista sitä voidaan käyttää veden höyryttämiseen höyryturbiinia varten. Lämpönsä vedelle luovuttanut suola jäähtyy noin 290 °C lämpötilaan, minkä jälkeen se siirtyy kylmän suolan säilytystankkeihin odottamaan uudelleenlämmitystä. Varastoidun kuumen suolan ansiosta voimalaitos pystyy reagoimaan paremmin sähkön kysynnän vaihteluihin ja sen on mahdollista tuottaa sähköä jopa 15 tuntia ilman auringon paistetta. Tällöin voimala voi siis toimia pelkällä auringon energialla läpi vuorokauden. Todellisuuden sovelluksissa kyseisellä toimintaperiaatteella voidaan operoida 65 % vuodesta ilman tarvetta toissijaiselle energianlähteelle. (Kalogirou 2014, s. 551–555)

Brayton-prosessi voi hyödyntää keskitetyn keräimen järjestelmää kahdella eri tavalla: vastaanottimeen absorboituneella energialla voidaan esilämmittää ilmaa prosessin polttoainetta varten tai energiaa voidaan siirtää lämmönsiirtofluidiin tarpeeksi, jotta se itsessään toimii kaasuturbiinin työkaasuna. Ensin mainittua, polttokammion sisältävää prosessia, voidaan käyttää myös hybridiprosessina Rankine-prosessin kanssa. (Behar et al. 2013) Jälkimmäinen on taas mahdollista yhdistää sulan suolan lämpövaraston omaavaan järjestelmään. Tällöin suola toimii lämmönsiirtofluidina ja kaasuturbiinissa työkaasuna käytetään ylikriittistä hiilidioksidia. (Wang et al. 2017)

### 3. PARABOLISET KAUKALOKERÄIMET

Paraboliset kaukalokeräimet ovat auringon suoraa säteilyä keskittäviä keräimiä, joita voidaan käyttää useassa käyttökohteessa. Ne ovat teknologialtaan kaikista keräimistä kehittyneimpiä ja niitä on myös tutkittu eniten. Ensimmäiset edelleen toimivat kaukalokeräimiin perustuvat voimalat aloittivat toimintansa jo 1980-luvun puolivälissä. Keskittävistä keräimistä kyseessä onkin vanhin teknologia, jolla voidaan saavuttaa lämmönsiirtofluidille yli 400 °C lämpötila. (Kalogirou 2014, s. 142–144, 544) Keräimet voidaan jaotella käyttökohteensa lämmöntarpeen mukaan kahteen luokkaan: sähköntuotannossa käytettäviin keräimiin ja erilaisten prosessien lämpöä tuottaviin keräimiin (Fernández-García et al. 2010).

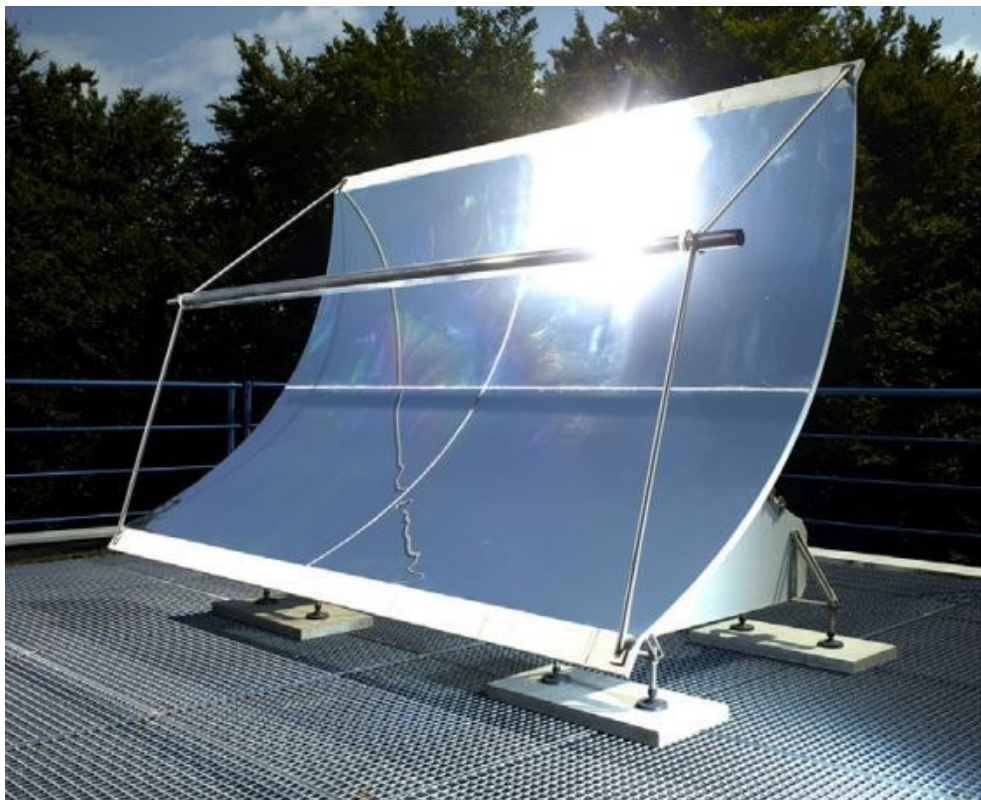
Käyttökohteista ensimmäistä eli sähköntuotantoa varten keräimiä käytetään suurina kenttinä, jotka tuottavat lämpöä Rankine-prosessille. Kyseistä keräintyyppiä käyttävien suurimpien sähköntuotannon voimaloiden teho voi olla jopa 354 MW. (Kalogirou 2014, s. 543–544) Yhdessä kentässä yksittäiset keräimet ovat yhdistetty toisiinsa ja järjestetty riveiksi, joiden pituus voi olla jopa 150 m. Keräimillä päästään tällöin höyryturbiinin vaatimaan 300–400 °C lämpötilaan. Toinen käyttökohde eli prosessien lämmöntuotto voi pitää sisällään muun muassa teollisuuden tarvitsemaa lämmintä vettä tai höyryä. Siihen voivat kuulua myös kotitalouksien lämpimän veden tuotto, tilojen ja uima-altaiden lämmitys sekä lämpöön perustuvat jäähdytyssovellukset. Kyseisten prosessien lämpötilan tarve on 100–250 °C ja keräimen koko saattaa olla huomattavasti pienempi kuin sähköntuotannon vastaavien. (Fernández-García et al. 2010)

Keräimet seuraavat auringon liikettä pääosin yhdellä vapausasteella ja ne voidaankin sijoittaa seuraamaan joko pohjois-etelä- tai länsi-itäsuunnassa. Näistä kummallakin suunnalla on etunsa ja huonot puolensa. Pohjois-eteläsuunnan seurannan etuja ovat: keräimen kallistuksen kulmaa ei tarvitse muuttaa yhden päivän aikana paljoakaan ja se on suunnattu suoraan aurinkoon keskipäivällä, jolloin säteily on voimakkainta. Sillä on myös tasaisempi suorituskky eri vuodenaikojen välillä verrattuna länsi-itäsuunnan seurantaan. Haittapuolena taas on sen heikko kyky kerätä säteilyenergiaa varhain aamulla tai myöhään illalla. Länsi-itäsuunnan seurannalla varustettu keräin taas kerää vähemmän säteilyä keskipäivällä ja eniten aamulla sekä illalla. Sen keräämä energia painottuu pääosin kesälle, talvisin suorituskky on selkeästi heikompi. Kokonaisuudessa sen avulla voidaan kuitenkin vuoden aikana kerätä hieman enemmän säteilyä kuin pohjois-

eteläsuunnan seurannalla. Auringon seurantaan valittava tyyppi riippuu siis täysin käyttökohteen sovelluksesta, toisin sanoen, tarvitaanko enemmän energiaa kesällä vai talvella. (Kalogirou 2014, s. 142–143)

### 3.1 Keräimen rakenne

Parabolinen kaukalokeräin koostuu kahdesta pääosasta: auringon säteet keskittävästä heijastavasta paraabelin muotoisesta pinnasta sekä keskitettyjen säteiden vastaanottimesta. Keräin on esitetty kuvassa 8. Vastaanotin on sijoitettu paraabelin polttolinjalle, jolloin siihen kohdistuu kaikki keräimen keskittämä säteily. Keskittämisen johdosta vastaanottimen pinta-ala voi olla varsin pieni verrattuna heijastimen pinta-alaan. Parabolisille kaukalokeräimille keskittämistä kuvaava suhdeluku on 10–85. (Kalogirou 2014, s. 126, 142–144)



**Kuva 8.** Parabolisen kaukalokeräimen prototyyppi (Forman et al. 2015, s. 374).

Säteilyä heijastava parabolinen osa ja sen kannattimet muodostavat keräimen perustan. Parabolinen osa on pyrittävä suunnittelemaan siten, että se on tarpeeksi tarkasti paraabelin muodossa säteiden heijastamista varten. Sopiva muoto saadaan aikaan rakentamalla parabolinen osa noudattamaan kaavaa

$$y = \frac{x^2}{4f}, \quad (2)$$

jossa  $y$  on korkeusakselin arvo,  $x$  on leveysakselin arvo ja  $f$  on haluttu polttolinjan etäisyys paraabelin keskipisteestä (Bellos & Tzivanidis 2019). Erään tyypillisen kaukalokeräimen tärkeimpiä mittoja ja ominaisuuksia on esitetty taulukossa 1. Paraabeli on päällystettävä hyvin heijastavalla materiaalilla eli kaavan (1) mukainen heijastuskerroin  $\rho$  tulisi olla mahdollisimman suuri. Käytössä olevilla keräimillä heijastuskerroin on noin 0,94. Suunnittelussa on myös otettava huomioon rakenteen oman painon sekä tuulen aiheuttamat voimat, jotka saattavat aiheuttaa vääristymää parabolisessa pinnassa. Tällöin sen materiaalit tulisi pyrkiä valitsemaan mahdollisimman jäykiksi, mutta keveiksi. Mahdollisia materiaaleja ovat esimerkiksi lasikuituun perustuvat komposiitit. Rakenteen jäykkyyttä voidaan pyrkiä lisäämään myös tukirakenteilla. (Kalogirou 2014, s. 144–145, 545)

**Taulukko 1** EuroTrough-keräimen tärkeimpiä arvoja (perustuu lähteeseen Kalogirou 2014, s. 545).

Käyttöönottovuosi	2004
Pinta-ala (m <sup>2</sup> )	817,5
Paraabelin aukeama (m)	5,77
Pituus (m)	148,5
Vastaanottimen halkaisija (m)	0,07
Keskittämisen suhdeluku	82
Optinen hyötysuhde	0,78
Vastaanottimen absorptiokerroin	0,95
Vastaanottimen emissiviteetti	0,14
Peilin heijastuskerroin	0,94
Suurin toimintalämpötila (°C)	390

Esimerkkinä hyvin suunnitellun tukirakenteen eduista voidaan pitää EuroTrough-keräimen niin sanottua Torque box -rakennetta. Se koostuu 12 m pitkistä, teräksestä valmistetuista kehikoista, joissa on kiinni parabolisen osan kannattimet. Muihin kaupallisessa käytössä oleviin keräimiin verrattuna, kyseinen rakenne on kevyempi ja kestää tuulen aiheuttamia voimia paremmin. (Kalogirou 2014, s. 145) Sen seurauksena parabolinen pinta kokee pienempiä muodonmuutoksia ja keräimen optinen hyötysuhde pysyy parempana (Fernández-García et al. 2010). Kehikko voidaan lisäksi rakentaa ainoastaan neljästä teräsosasta, jolloin sen valmistus yksinkertaistuu ja tulee halvemmaksi (Kalogirou 2014, s. 145).

Keräimen heijastuskerrointa ja siten optista hyötysuhdetta saattavat huonontaa myös pölyn ja lian kertyminen heijastavalle osalle. Tämä on yleistä erityisesti aavikoilla, joille

keräimiin perustuvia voimaloita rakennetaan varsin usein käytössä olevan maan halpuuden ja saatavilla olevan auringon paisteen vuoksi. Heijastuskerroin on mahdollista palauttaa alkuperäiselle tasolle pesemällä heijastuspintoja säännöllisesti. Pesuun voidaan käyttää esimerkiksi suuren paineen vesisuhkuja, joiden vedestä on poistettu mineraaleja paremman lopputuloksen aikaansaamiseksi. (Kalogirou 2014, s. 548)

Toimiakseen keräin tarvitsee auringon seurantaan järjestelmän. Seurantajärjestelmän on oltava luotettava ja kyttävä seuraamaan auringon liikettä riittävällä tarkkuudella niin suorassa paisteessa kuin pilviselläkin säällä. Yöllä sen on myös palautettava keräin sopivaan asentoon aamua varten. Seurantajärjestelmällä voidaan lisäksi suojata keräintä liian kovilta tuuilta muuttamalla kaukalon asentoa tai ylikuumentumiselta lämmönsiirtofluidin virtauksen katketessa. (Kalogirou 2014, s. 145)

Seurantajärjestelmä voi olla joko täysin mekaaninen tai elektroninen. Elektronisella järjestelmällä päästään kuitenkin parempaan luotettavuuteen ja tarkempaan seurantaan. On kuitenkin huomattava, että elektroninen sähkömoottoreilla toimiva järjestelmä soveltuu pääosin vain kevyemmille keräimillä ja raskaammille yksiköille tulisi käyttää hydraulikkaan perustuvia järjestelmiä. Elektroninen järjestelmä voi toimia kahdella tavalla: sähkömoottoreita voidaan ohjata auringon säteilyä mittaavien sensoreiden tietojen perusteella tai tietokoneohjattuna algoritmien perusteella. Näistä ensimmäinen voi perustua esimerkiksi valoherkkiin sensoreihin. Sensorit on sijoitettu siten, että varjoon joutuessaan ne antavat moottorille käskyn kääntää keräintä, kunnes ne ovat taas suorassa paisteessa. Pilviselle säälle on oma sensorinsa, joka ajastinta käyttäen ohjaa keräimen seuraamaan auringon arvioitua liikettä. Yötä tarkkailevan sensorin tehtävänä on määrittää, milloin aurinko on laskenut ja keräin voidaan palauttaa aamun asentonsa. Tietokoneohjattu seurantajärjestelmä taas laskee algoritmin perusteella auringon liikettä ja vertaa sitä keräimen akselin asentoon, muuttaen asentoa tarvittaessa. (Kalogirou 2014, s. 145–148)

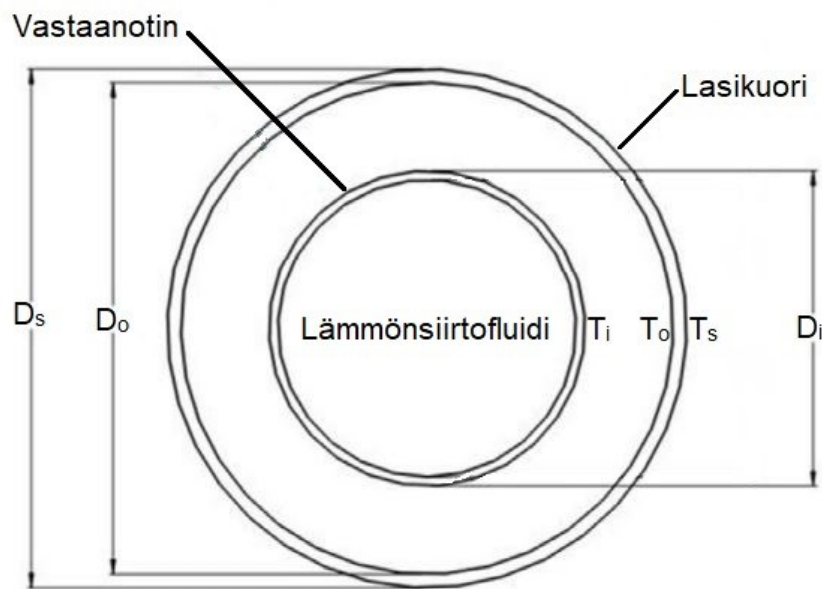
Keräimen vastaanotin välittää säteiden energian sisällään kulkevaan lämmönsiirtofluidiin. Vastaanotin on metallista valmistettu lineaarinen putki, joka on päällystetty korkean absorptiokertoimen selektiivisellä pinnoitteella. Käytössä olevien keräimien vastaanottimien absorptiokertoimet ovat 0,94–0,99. Niiden emissiviteetti on pyritty saamaan mahdollisimman pieneksi, ollen 0,1–0,3. Vastaanotin on yleensä päällystetty lasista valmistetulla suojakuorella, jolla pyritään ehkäisemään lämpöhäviöitä. Vastaanottimen ja lasikuoren välinen tila voi olla lisäksi lähellä tyhjiötä, jolloin konvektiiviset lämpöhäviöt pienenevät entisestään. Lasikuori ei kuitenkaan päästä lävitseen kaikkea paraabelin heijastamaa säteilyä, mikä hieman heikentää optista hyötysuhdetta. (Kalogirou 2014, s. 142–144, 545)



Vastaanottoimeen ei myöskään välttämättä osu kaikki keräimen keskittämät säteet, johtuen vääristymistä paraabelin muodossa tai liasta paraabelin pinnalla. Kyseistä epätarkkuutta voidaan korjata käyttämällä toissijaista heijastinta vastaanottimen päällä, joka kohdistaa hajasäteet vastaanottoimeen parantaen optista hyötysuhdetta. Kyseessä voi olla esimerkiksi CPC-keräimen heijastimen tyyppinen paraabelinen pinta. Toissijainen heijastin lisäksi tasaa vastaanottimelle tulevaa lämpövirtaa sen eri puolille, mikä muuten olisi painottunut täysin paraabelin puolelle. Heijastin myös pienentää seurantajärjestelmältä vaadittavaa tarkkuutta. (Bellos & Tzivanidis 2019)

### 3.2 Keräimen lämpöhäviöt

Parabolisen kaukalokeräimen lämpöhäviöt tapahtuvat vastaanottimen kautta. Korkean lämpötilan sovelluksissa vastaanotin on yleensä päällystetty lasista valmistetulla suojakuorella. (Kalogirou 2012) Vastaanottimen ja lasikuoren poikkileikkaus on esitetty kuvassa 9. Tässä kappaleessa tullaan esittelemään juuri kyseisenlaisen vastaanottimen lämpöhäviöiden yhtälöt. Yhtälöt esitellään tapaukselle, jossa lasin ja vastaanottimen välissä on ilmaa, sekä huomioidaan mahdollisuus tyhjiöityyn välitilaan.



**Kuva 9.** Parabolisen kaukalokeräimen vastaanottimen poikkileikkaus (perustuu lähteeseen Bellos & Tzivanidis 2019, s. 85).

Vastaanottimen lämpöhäviöt koostuvat johtumisesta, konvektiosta sekä säteilystä. Lämpöhäviöiden suuruus riippuu auringon säteilyn voimakkuudesta, vallitsevista tuuliolosuhteista sekä vastaanottoimeen valituista materiaaleista. Vastaanottimen absorboima



säteilyteho ei jakaudu sen pinnalla tasaisesti, jolloin myöskin lämpöhäviöt ovat erisuuria paikasta riippuen. Lämpöhäviöiden yksinkertaistamiseksi kuitenkin oletetaan, että vastaanottimen pinta on joka kohdassa samassa, ajasta riippumattomassa lämpötilassa. Vastaanottimen kuumimman kohdan voidaan olettaa olevan sen putken ulkopinnalla, joten lämpöhäviöiksi luetaan kaikki siitä ympäristöön poistuva lämpö. Johtumista tapahtuu tällöin vain lasikuoressa. (Kalogirou 2012) Johtumisen lämmönsiirto mittayksikköä kohden määritellään onton sylinterimäisen kappaleen lämmönjohtumisen kaavalla

$$\dot{Q} = \frac{2\pi k(T_s - T_o)}{\ln\left(\frac{r_s}{r_o}\right)}, \quad (3)$$

jossa  $k$  on sylinterin lämmönjohtavuus,  $T$  on lämpötila ja  $r$  on sylinterin säde (Çengel & Ghajar 2015, s. 161). Alaindeksillä  $o$  tarkoitetaan lasikuoren sisäseinämää ja alaindeksillä  $s$  ulkoseinämää.

Konvektiota tapahtuu vastaanottimen putken ja lasikuoren välillä sekä lasikuoresta ympäröivään ilmaan. Vastaanottimen ja lasikuoren välitilan konvektio riippuu siellä vallitsevasta ilmanpaineesta. Jos paine on alle 0,013 Pa, voidaan välitilan olettaa olevan tyhjiö. Tyhjiölle on mahdollista laskea konvektiivinen lämmönsiirtokerroin perustuen vapaaseen molekyylien väliseen konvektioon. Kyseinen lämmönsiirtokerroin on kuitenkin usein niin pieni (ilmalle noin  $1,115 \cdot 10^{-4} \text{ W/m}^2\text{K}$ ), että konvektiota ei tarvitse tyhjiössä ottaa huomioon. Jos paine on suurempi kuin 0,013 Pa, konvektio välitilassa on luonnollista konvektiota. (Kalogirou 2012) Luonnollinen konvektio mittayksikköä kohti lasketaan yhdensuuntaisten sylinterien tapauksessa kaavalla

$$\dot{Q} = \frac{2\pi k_{eff}}{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}(T_i - T_o), \quad (4)$$

jossa  $k_{eff}$  on efektiivinen lämmönjohtavuus ja  $D$  on sylinterin halkaisija (Çengel & Ghajar 2015, s. 555). Alaindeksillä  $i$  tarkoitetaan sisempää sylinteriä eli vastaanotinta. Efektiivinen lämmönjohtavuus lasketaan kaavalla

$$\frac{k_{eff}}{k} = 0,386 \left( \frac{Pr}{0,861 + Pr} \right)^{1/4} (F_{cyl} Ra_L)^{1/4}, \quad (5)$$

jossa  $Pr$  on väliaineen Prandtin luku,  $F_{cyl}$  on yhdensuuntaisten sylinterien geometrinen kerroin ja  $Ra_L$  on Rayleighin luku. Kaavan (5) käytön ehtoina ovat  $0,70 \leq Pr \leq 6000$  ja  $10^2 \leq F_{cyl} Ra_L \leq 10^7$ . Jos  $F_{cyl} Ra_L < 100$ , tulee valita  $k_{eff} = k$ , eli luonnollinen konvektio käsitellään tavallisena johtumisena väliaineessa. (Çengel & Ghajar 2015, s. 555–556) Rayleighin luku määritellään kaavalla

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_i - T_o)L_c^3}{\nu^2} Pr, \quad (6)$$

jossa  $g$  on putoamiskiihtyvyys,  $\beta$  on väliaineen tilavuuden lämpötilakerroin,  $L_c$  on karakteristinen mitta ja  $\nu$  on väliaineen kinemaattinen viskositeetti (Çengel & Ghajar 2015, s. 553). Tilavuuden lämpötilakerroin ideaalikaasulle määritellään kaavan  $\beta = 1/T$  mukaan (Çengel & Ghajar 2015, s. 536). Karakteristinen mitta määritellään kaavan  $L_c = (D_o - D_i)/2$  mukaan (Çengel & Ghajar 2015, s. 555). Yhdensuuntaisten sylinterien geometrisen kerroin määritellään kaavan

$$F_{cyl} = \frac{\left[\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)\right]^4}{L_c^3(D_i^{-3,5} + D_o^{-3,5})^5} \quad (7)$$

mukaan (Çengel & Ghajar 2015, s. 556).

Lasikuoresta ympäröivään ilmaan konvektio tapahtuu joko luonnollisella konvektiolla tai tuulen vaikutuksesta pakotetulla konvektiolla (Kalogirou 2012). Oletetaan, että keräimen ympäristössä on jatkuvasti edes vähäinen ilmavirta, jolloin luonnollinen konvektio voidaan jättää huomiotta. Pakotettu konvektio sylinterin pinnalta määritellään kaavalla

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty), \quad (8)$$

jossa  $h$  on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ja  $A_s$  on sylinterin vaipan pinta-ala (Çengel & Ghajar 2015, s. 428). Alaindeksillä  $\infty$  tarkoitetaan ympäristöä. Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin saadaan kyseisessä tapauksessa Nusseltin luvun  $Nu$  kaavasta

$$Nu = \frac{hD_s}{k} = CRe^mPr^{1/3}, \quad (9)$$

jossa  $Re$  on Reynoldsin luku,  $D_s$  on lasikuoren ulkopinnan halkaisija ja  $C$  sekä  $m$  ovat vakioita (Çengel & Ghajar 2015, s. 442). Kyseiset vakiot saadaan taulukosta 2. Reynoldsin luku lasketaan kaavalla

$$Re = \frac{VD_s}{\nu}, \quad (10)$$

jossa  $V$  on virtaavan väliaineen nopeus (Çengel & Ghajar 2015, s. 391).

**Taulukko 2** Vakioiden  $C$  ja  $m$  riippuvuus Reynoldsin luvusta (perustuu lähteeseen Çengel & Ghajar 2015, s. 443).

$Re$	$C$	$m$
0,4–4	0,989	0,330
4–40	0,911	0,385
40–4000	0,683	0,466
4000–40 000	0,193	0,618
40 000–400 000	0,027	0,805

Säteilyllä lämpöä siirtyy vastaanottimen ja lasikuoren välillä sekä lasin taivaan välillä (Kalogirou 2012). Vastaanottimen ja lasikuoren välillä siirtynyt lämpö saadaan kahden yhdensuuntaisen sylinterin säteilyn lämmönsiirron kaavalla

$$\dot{Q} = \frac{A_i \sigma (T_i^4 - T_o^4)}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1 - \varepsilon_o}{\varepsilon_o} \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^2}, \quad (11)$$

jossa  $\sigma$  on Stefanin-Boltzmannin vakio (Çengel & Ghajar 2015, s. 28, 789). Lasikuoren ja taivaan välinen säteilylämmönsiirto saadaan kaavalla

$$\dot{Q} = A_s \sigma \varepsilon_s (T_s^4 - T_{sky}^4), \quad (12)$$

jossa alaindeksi  $sky$  tarkoittaa taivasta (Çengel & Ghajar 2015, s. 789).

### 3.3 Käyttösovellukset

Kuten aiemmin mainittu, parabolisia kaukalokeräimiä voidaan käyttää monissa soveluksissa. Varsin merkittävä sovellus on sähköntuotanto. Chaanaouin et al. (2016) mukaan keskittävillä aurinkokeräimillä toimivista sähköntuotannon voimaloista suurin osa on parabolisiin kaukalokeräimiin perustuvia. Vuonna 2016 kaukalokeräimiin perustuvat voimalat käsittivät 147 voimalaa kaikista 240:stä. Lukuun kuuluvat tutkimuskäytössä olleet voimalat sekä 127 kaupallista voimalaa. Tehoa ne tuottivat yhteensä 3,5 GW. (Chaanaoui et al. 2016)

Voimaloiden toiminta perustuu pääosin Rankine-prosessiin joko höyrystämällä vesi suoraan keräimien vastaanottimissa tai välillisesti käyttämällä lämmönsiirtofluidina siihen tarkoitettua öljyä. Rankine-prosessissa voidaan käyttää tulistusta sekä välitulistusta ja se voidaan myös hybridisoida fossiilisten polttoaineiden kanssa varsin helposti. Hybridisointi tulee erityisesti tarpeeseen aikoina, jolloin auringon paistetta on vähän tai ei ollenkaan ja voimalalla ei ole lämpövarastoa. Sen avulla poistetaan lisäksi tarve päivittäiselle höyryturbiinin käynnistämiseksi ja sammuttamiseksi, mikä on varsin epätaloudellista terminen hyötysuhteen kannalta. (Fernández-García et al. 2010)

Fossiilisia polttoaineita voidaan käyttää joko suoraan tuottamaan höyryä ja tulistamaan se tai keräimien apuna esimerkiksi pelkässä tulistuksessa. Hybridisointi toteutetaan joko ylimääräisellä kattilalla tai kaasuturbiinilla. Kaasuturbiinin tapauksessa, eli Brayton-prosessissa, sähköä tuotetaan myös kaasuturbiinilla itsellään. Turbiinin jälkeen savukaasut luovuttavat lämpöenergiansa Rankine-prosessille tulistimessa tai höyrystimessä. Aurinkokeräimien tuottama korkeapaineinen höyry voidaan kyseisessä tapauksessa lisätulistaa savukaasuista saatavalla lämmöllä tai ajaa matalapaineisena matalapaineturbiinin läpi. (Fernández-García et al. 2010)

Yleisin voimaloissa käytetty lämmönsiirtofluidi on synteettinen öljy. Se pumpataan keräimien vastaanottimien läpi lähtölämpötilan ollessa noin 300 °C. Keräimissä se lämpe-  
nee noin 390 °C lämpötilaan, minkä jälkeen se luovuttaa lämpönsä lämmönvaihtimen  
kautta Rankine-syklin vedelle, palaten takaisin lähtölämpötilaan. (Chaanaoui et al. 2016)  
Kuten mainittu, lämmönsiirtofluidina voidaan käyttää myös vettä, joka höyrystyy ja tulis-  
tuu keräimen vastaanottimessa. Suoran höyrymuodostuksen etuna on synteettiseen  
öljyyn nähden yksinkertaisempi järjestelmä ja pienemmät lämpöhäviöt sillä ylimääräistä  
lämmönsiirrintä ei tarvita. Haasteena on kuitenkin höyryturbiinin vaatiman tasaisen mas-  
savirran ylläpitäminen useissa pitkissä vastaanottimen putkissa, veden ollessa kak-  
sifaasialueella. Virtauksen ylläpitoa vaikeuttaa myös auringon säteilyenergian ajoittainen  
muuttuminen esimerkiksi pilvisyyden mukaan. (Kalogirou 2014, s. 546, 549) Öljyn ja ve-  
den lisäksi lämmönsiirtofluidina on mahdollista käyttää myös sulaa suolaa tai ilmaa. Il-  
maa käytettäessä voidaan päästä jopa 560 °C lämpötilaan, minkä ansiosta Rankine-pro-  
sessin hyötysuhteesta saadaan suurempi kuin synteettisen öljyn vastaavasta. (Chaa-  
naoui et al. 2016) Sulaa suolaa käytettäessä, se voidaan varastoida lämpövarastoina  
toimiviin tankkeihin, jolloin sähköntuotanto jatkuu auringon laskettua (Kalogirou 2014, s.  
546). Varastointijärjestelmä toimii siis samaan tapaan kuin keskitetyn vastaanottimen  
voimaloissa.

Parabolisiin kaukalokeräimiin perustuvat voimalat pitävät sisällään monia etuja: saas-  
teeton energiantuotanto toimittaessa vain aurinkoenergialla, työllistävä vaikutus niin ra-  
kennusvaiheessa kuin normaalissa käytössä ja myös edullisimmat sähköntuotannon  
kustannukset muihin aurinkokeräimiin perustuviin voimaloihin nähden. Kaukalokeräimiin  
perustuvilla voimaloilla on myös omat haasteensa: tarvittava maan ala on varsin suuri ja  
sitä ei voida käyttää tehokkaasti muihin tarkoituksiin, mahdolliset lämmönsiirtofluidin  
vuodot saattavat aiheuttaa ongelmia maaperässä, fossiilisilla polttoaineilla hybridisoidut  
voimalat tuottavat myös jonkin verran kasvihuonekaasupäästöjä ja Rankine-prossin tar-  
vitsema jäähdytysvettä voi olla vaikea saada käyttöön aavikkoalueilla, joilla voimalat  
usein sijaitsevat. Aavikkoalueisiin liittyy myös sähkönsiirto-ongelma, sillä ne saattavat  
usein sijaita kaukana kaupungeista, joihin sähkö tulisi toimittaa. Kyseisille alueille voima-  
loiden rakentaminen riippuu siis pitkälti valtioiden tai sähkönsiirtoyhtiöiden halusta tarjota  
riittävä sähkönsiirtokapasiteetti. (Kalogirou 2014, s. 549–551)

Teollisuuden sovelluksiin parabolisia kaukalokeräimiä voidaan käyttää hieman mata-  
lammilla lämpötiloilla. Kalogiroun (2014, s. 398) mukaan 60–220 °C lämpötila-alueella  
toimii monia teollisuuden prosesseja kuten paperin, kemikaalien, ruoan, erilaisten juo-  
mien ja vaatteiden valmistus. Aurinkokeräimiä käytettäessä on kuitenkin otettava huomi-  
oon, että niillä ei voida tuottaa lämpöä ympäri vuorokauden toimivalle prosessille. Lisäksi  
teollisuuden prosessit tarvitsevat usein paljon energiaa, minkä johdosta keräinten alan

on oltava suuri. Se saattaa aiheuttaa ongelmia keräinten sijoittelussa. Keräimiä voidaan-kin sijoittaa jo olemassa olevien rakennusten katoille tai teollisuuskiinteistöjen maa-alueille. Katoille sijoittamisessa on huomioitava kattorakenteiden kestävyys, mahdollinen keräinten toisiaan varjostava vaikutus ja katon suuntaus auringon kulkusuuntaan nähdessä. Keräimiä sijoitettaessa kiinteistöjen maa-alueille on taas huomioitava niiden etäisyys lämpöä tarvitsevasta prosessista. Etäisyyden kasvaessa tarvitaan pidempiä putkia lämmönsiirtofluidille, mikä lisää lämpöhäviöitä. (Kalogirou 2014, s. 397–399)

Parabolisia kaukalokeräimiä voidaan käyttää myös jäähdytyssovelluksissa, joissa keräin tuottaa lämpöä absorptioprosessilla toimivalle jäähdytyslaitteelle. Kyseiset prosessit perustuvat höyrystimessä kaasuuntuneen kylmäaineen liukenemiseen nesteeseen, jonka painetta nostetaan pumppauksella. Korkeammalla painetasolla liukseen tuodaan keräimen tuottamaa lämpöä, jolloin kylmäaine poistuu liuksesta lauhduttimeen. Tavanomaisiin jäähdytyslaitteisiin verrattuna kyseiset laitteet eivät siis tarvitse kompressorin tekemää työtä, vaan ne pohjautuvat pääosin keräimen tuottamaan lämpöön. (Cabrera et al. 2013)

## 4. PARABOLISEN KAUKALOKERÄIMEN LÄMPÖHÄVIÖIDEN VERTAILU

Kaukalokeräimen lämpöhäviöitä tarkasteltaessa voidaan olettaa niiden jakautuneen tasaisesti vastaanottimen pinnalle sekä olevan ajasta riippumattomia, kuten luvussa 3.2 on mainittu. Tässä luvussa tarkastellaan, miten vastaanottimen lämpöhäviöt eroavat, kun verrataan ilmalla täytettyä vastaanottimen ja sen suojakuoren välistä tilaa (Tapaus 1) vastaavaan, joka on tyhjiössä (Tapaus 2). Vertailu suoritetaan laskemalla vastaanottimen lämpöhäviöt pituusyksikköä kohden kummassakin tapauksessa käyttäen luvun 3.2 yhtälöitä.

Vertailua varten pohjaksi on valittu EuroTrough-keräimen vastaanotin, jonka dimensiot on esitetty taulukossa 1. Laskuja varten taulukko 1 ei kuitenkaan tarjoa kaikkia lähtötietoja, jolloin osa lähtötiedoista on haettu lähdekirjallisuudesta ja osa on päätetty. Lähtötiedot on esitetty liitteessä A.

### 4.1 Laskentamenetelmät

Vakiolämpötilassa  $T_i$  olevasta vastaanottimen ulkopinnasta ympäristöön päin muodostuu kolme resistanssia lämpövirralle: vastaanottimen välitilan konvektio ja säteily, johtuminen lasikuoressa sekä konvektio ja säteily ympäristöön. Jokaisen vaiheen yli lämpövirta on sama. Tämän perusteella tapauksessa 1 laskut aloitetaan arvaamalla lasikuo- ren ulkopinnan lämpötila  $T_s$ . Sen jälkeen voidaan laskea lämpövirta ympäristön ja kuoren pinnan välillä. Konvektiolle selvitetään aluksi ilman aineominaisuudet lämpötilassa  $T_{ave,s} = (T_s + T_\infty)/2$ . Tämän jälkeen voidaan laskea Reynoldsin luku kaavan (10) mukaan. Reynoldsin luvun perusteella saadaan taulukosta 2 arvot vakioille  $C$  ja  $m$ , minkä jälkeen voidaan selvittää Nusseltin luku kaavan (9) mukaan. Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin saadaan Nusseltin luvun avulla, kun kaava (9) johdetaan muotoon  $h = (kNu)/D_s$ . Lämpövirta pituusyksikköä kohden saadaan kaavoilla (8) ja (12), kun pinta-alana käytetään  $A_s = \pi D_s L$ , jossa  $L = 1$  m.

Lämpövirta lasikuoressa saadaan kaavalla (3). Koska lämpövirta tiedetään, voidaan kaava saattaa muotoon

$$T_o = \frac{\dot{Q} \ln\left(\frac{D_s}{D_o}\right)}{2\pi k_o} + T_s, \quad (13)$$

jossa  $T_o$  on lasikuoren sisäpinnan lämpötila. Kun sisäpinnan lämpötila on tiedossa, voidaan laskea lämpövirta vastaanottimen ja lasikuoren välitilalle. Konvektiolle selvitetään aluksi ilman aineominaisuudet lämpötilassa  $T_{ave,i} = (T_i + T_o)/2$ . Tämän jälkeen voidaan selvittää Rayleighin luku kaavalla (6) ja yhdensuuntaisten sylinterien geometrinen kerroin kaavalla (7). Jos niiden tulo ja Prandtin luku täyttävät luvussa 3.2 annetut ehdot, lasketaan efektiivinen lämmönjohtavuus  $k_{eff}$  kaavalla (5). Jos luvut eivät täytä kaavan (5) käytön ehtoja, käytetään  $k_{eff} = k$ . Sen jälkeen voidaan laskea lämpövirta välitilassa käyttäen kaavoja (4) ja (11). Kaavassa (11) pinta-alana käytetään  $A_i = \pi D_i L$ , jossa  $L = 1$  m. Kun lämpövirralle on saatu arvo, sitä verrataan aluksi laskettuun lämpövirtaan, joka on todennäköisesti erisuuruinen. Nyt kaikki lasketut arvot riippuvat alussa arvatusta lämpötilasta  $T_s$ , joten sitä muuttamalla voidaan päästä tilanteeseen, jossa lasketut lämpövirrat ovat yhtä suuret. Lämpötilalle  $T_s$  voidaan hakea sopiva arvo esimerkiksi Microsoft Office Excel -ohjelman Tavoitteen haku -työkalulla. Kun lämpötilalle on saatu sopiva arvo, tarkistetaan ovatko ilman aineominaisuudet edelleen oikeat mahdollisissa uusissa lämpötiloissa. Jos aineominaisuudet ovat väärät, haetaan niille taulukoista uudet arvot ja toistetaan laskuprosessi alusta.

Tapauksessa 2 laskut perustuvat samoihin yhtälöihin ja menetelmiin kuin tapauksessa 1. Välitilan konvektio jätetään kuitenkin huomiotta, sillä luvussa 3.2 todettiin sen olevan tyhjiössä mitätön. Laskut toteutetaan siis arvaamalla lasikuoren ulkopinnan lämpötila  $T_s$ , jonka avulla selvitetään ilman aineominaisuudet ja lopulta saadaan selville lämpövirta. Edelleen selvitetään kaavan (13) avulla lasikuoren sisälämpötila  $T_o$ . Lämpövirta välitilassa saadaan nyt pelkästään säteilystä kaavalla (11). Jälleen verrataan kahta laskettua lämpövirtaa ja muutetaan lämpötilaa  $T_s$ , kunnes lämpövirrat ovat yhtä suuret. Tässäkin tapauksessa on tarkistettava, että ilman aineominaisuudet ovat oikeat uusilla lämpötiloilla. Jos aineominaisuudet ovat väärät, haetaan niille taulukoista uudet arvot ja toistetaan tapauksen 2 laskuprosessi alusta.

## 4.2 Laskujen tulokset ja lämpöhäviöiden vertailu

Vastaanottimen lämpötilaksi valitun  $T_i = 673,15$  K ja muiden liitteessä A taulukoitujen lähtöarvojen perusteella tapauksessa 1 lasikuoren pintalämpötilaksi saatiin  $T_{s1} = 380,11$  K, Reynoldsin luvuksi  $Re_1 = 5379,75$  ja Nusseltin luvuksi  $Nu_1 = 34,97$ . Liitteen A lähtöarvot ilman ominaisuuksille ovat molemmissa tapauksissa peräisin kahdesta laskukierroksesta, joten niitä vastaavat tulokset ovat lopulliset. Kaavasta (9) laskettiin konvektiiviseksi lämmönsiirtokertoimeksi  $h_1 = 9,63$  W/m<sup>2</sup>K. Kaavoilla (8) ja (12) lämpövirraksi saatiin  $\dot{Q}_{s-\infty 1} = 528,77$  W/m. Lasikuoren sisäpinnan lämpötilaksi laskettiin  $T_{o1} = 382,49$  K.

Välitilan konvektiota varten laskettu yhdensuuntaisten sylinterien geometrinen kerroin oli  $F_{cyl} = 8,36 \cdot 10^{-18}$  ja Rayleighin luku  $Ra_L = 7566,87$ . Niiden tuloksi saatiin  $F_{cyl} Ra_L = 6,33 \cdot 10^{-14}$ , joka ei täytä kaavan (5) käytölle asetettua ehtoa  $10^2 \leq F_{cyl} Ra_L \leq 10^7$ . Tämän vuoksi voidaan todeta vastaanottimen välitilan luonnollisen konvektion virtojen olevan niin mitättömät, että konvektiivinen lämmönsiirto voidaan käsitellä johtumisena. Sen vuoksi kaavassa (4) käytettiin  $k_{eff} = k_{i1}$ . Lasketuilla arvoilla välitilan lämpövirraksi saatiin yhtä suuri arvo kuin lasikuoren ja ympäristön väliseksi lämpövirraksi  $\dot{Q}_{i-o1} = \dot{Q}_{s-\infty1} = 528,77 \text{ W/m}$ .

Tapaukselle 2 lasikuoren pintalämpötilaksi saatiin  $T_{s2} = 348,06 \text{ K}$ , Reynoldsin luvuksi  $Re_2 = 5672,97$  ja Nusseltin luvuksi  $Nu_2 = 36,18$ . Kaavasta (9) laskettiin konvektiiviseksi lämmönsiirtokertoimeksi  $h_2 = 9,70 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Kaavoilla (8) ja (12) lämpövirraksi saatiin  $\dot{Q}_{s-\infty2} = 329,26 \text{ W/m}$ . Lasikuoren sisäpinnan lämpötilaksi laskettiin  $T_{o2} = 349,55 \text{ K}$ . Välitilan säteilylämpövirran suuruudeksi saatiin  $\dot{Q}_{i-o2} = \dot{Q}_{s-\infty2} = 329,26 \text{ W/m}$ .

Tapauksien 1 ja 2 lämpövirtojen erotus on  $\dot{Q}_{i-o1} - \dot{Q}_{i-o2} = 198,92 \text{ W/m}$ . Tapauksessa 2 lämpövirta on siis 37,62 % pienempi kuin tapauksessa 1. Näin ollen voidaan todeta, että kyseisenlaisessa vastaanottimessa lämpöhäviöt pienenevät varsin runsaasti, jos vastaanottimen välitila on tyhjiössä. Lämpöhäviöiden pienentyessä yhä suurempi osa vastaanottimeen absorboituneesta energiasta saadaan hyötykäyttöön. Tapauksissa lämpöhäviöiden mallia on yksinkertaistettu ja vastaanottimen dimensiot eivät todennäköisesti vastaa täysin todellisia. Siitä huolimatta voidaan kuitenkin päätellä, että tulos on vähintäänkin suuntaa antava todellisuuden sovelluksista.



## 5. YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tutustua yleisesti erilaisiin aurinkokeräimiin sekä niiden sovel-luksiin. Lisäksi tarkoitus oli tarkastella tarkemmin parabolisia aurinkokeräimiä sekä tutkia laskujen avulla kahden eri lailla toteutetun keräimen lämpöhäviöitä. Keräimien tarkastelu suoritettiin kirjallisuuslähteitä apuna käyttäen ja laskut suoritettiin tutkimuksen tekijän toi-mesta.

Toisessa luvussa käsiteltiin aluksi teoriaa liittyen auringon emittoimaan säteilyyn ja siihen, miten sitä voidaan käyttää hyödyksi eri tavoin. Maahan saapuvan säteilyenergian todettiin olevan moninkertainen ihmiskunnan energiantarpeeseen verrattuna. Tämän pe-rusteella voidaan päätellä, että päästöttömän aurinkoenergian potentiaali on lähes raja-ton. Ainoat asiat, mitkä sen täysimittaista käyttöä rajoittavat, ovat ihmiskunnan omat pää-tökset energianlähteiden käytön suhteen. Seuraavaksi luvussa esiteltiin yleisimpiä au-rinkokeräimiä ja selvitettiin niiden pääasiallisia käyttökohteita. Keräimien todettiin toimi-van varsin erilaisilla lämpötila-alueilla ja eri suuruisissa kokoluokissa riippuen käyttökoh-teen tarpeista. Osalle aurinkokeräimistä esitettiin myös mahdollisia tulevaisuuden paran-nuksia, lähtien pienistä lämmönsiirtoon liittyvistä parannuksista päätyen suurempiin voi-malaitosten käytettävyyttä parantaviin teknologioihin. Varsin tärkeänä parannuksena voi-daankin pitää mahdollisuutta varastoida lämpöenergiaa silloin kun aurinko paistaa, käy-tettäväksi aikoina, jolloin paistetta ei ole saatavilla. Kyseisten teknologioiden ansiosta aurinkokeräimiin perustuvia voimaloita voidaan pitää yhä kilpailukykyisempinä verrat-tuna fossiilisten polttoaineiden voimaloihin.

Parabolisten kaukalokeräimien ominaisuuksia käsiteltiin luvussa 3. Keräimien todet-tiin soveltuvan niin matalan lämpötilan sovelluksiin kuin voimalaitoskäyttöön suurem-massa kokoluokassa. Keräimen rakenteesta kerrottiin valmistuksessa huomioitavia vaa-timuksia onnistuneen kokonaisuuden saamiseksi sekä mahdollisia toimintaa parantavia ominaisuuksia. Luvussa käsiteltiin lisäksi keräimen vastaanottimen lämpöhäviöiden yh-tälöitä sekä tarkemmin erilaisia käyttökohteita. Vaikka paraboliset kaukalokeräimet ovat vanhinta keräinteknologiaa, voidaan luvun 3 perusteella todeta niiden olevan edelleen yksi tärkeimmistä keräintyypeistä. Tärkeys korostuu erityisesti sähköntuotannossa, jossa kokemuksia kyseisen voimalatyyppin käytöstä on usealta vuosikymmeneltä. Kokemuksiin pohjaten, erilaisten aurinkovoimaloiden toimintaa voidaan kehittää tulevaisuudessa yhä tehokkaammaksi ja kannattavammaksi.

Luvussa 4 laskettiin parabolisen kaukalokeräimen vastaanottimen lämpöhäviöitä, käyttäen hyväksi luvussa 3.2 esiteltyjä lämpöhäviöiden yhtälöitä. Laskut suoritettiin kuvitteellisessa tilanteessa kahdelle erilaiselle vastaanottimelle. Niistä toisella vastaanottimen ja sen suojalasin välitila oli tyhjiössä ja toisen välitilassa oli ilmanpaine. Laskujen tuloksena saatiin, että tyhjiöidyn välitilan vastaanottimen lämpöhäviöt olivat 37,62 % pienemmät kuin vastaavalla, missä välitilassa oli ilmanpaine. Tuloksen perusteella voidaan siis päätellä, että vastaanottimen välitila kannattaa olla tyhjiössä, paremman termisen hyötysuhteen aikaansaamiseksi. Korkeampi hyötysuhde johtaa tällöin suurempaan käytettävissä olevaan lämpöenergian määrään ja täten esimerkiksi voimalaitoksessa suurempaan sähköntuotannon tehoon.

Kokonaisuutena aurinkokeräimien voidaan todeta olevan varsin tärkeitä tulevaisuuden kannalta muiden uusiutuvien energiantuotantomenetelmien rinnalla. Fossiilisten energianlähteiden loppuessa, uusia energiantuotantomuotoja on oltava saatavilla yhä kasvavalle sivilisaatiolle. Keräimillä voidaan vastata energiantarpeeseen, sillä niitä voidaan käyttää lähes kaikkialla maapallolla ja tulevien parannusten avulla niiden käyttö tulee tehostumaan entisestään. Tulevaisuuden kannalta tärkeää olisikin, että aurinkokeräimiin perustuvaan energiantuotantoon investoitaisiin mahdollisimman pian, eikä vasta fossiilisten energianlähteiden loppuessa.

## LÄHTEET

- Behar, O., Khellaf, A. & Mohammedi, K. (2013). A review of studies on central receiver solar thermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 23. pp. 12–39.
- Bellos, E., Korres, D., Tzivanidis, C. & Antonopoulos, K.A. (2016). Design, simulation and optimization of a compound parabolic collector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Vol. 16. pp. 53–63.
- Bellos, E. & Tzivanidis, C. (2019). Alternative designs of parabolic trough solar collectors. *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 71. pp. 81–117.
- Cabrera, F.J., Fernández-García, A., Silva, R.M.P. & Pérez-Garzía, M. (2013). Use of parabolic trough solar collectors for solar refrigeration and air-conditioning applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 20. pp. 103–118.
- Çengel, Y.A. & Boles, M.A. (2015). *Thermodynamics: An engineering approach*, Chapter 18. McGraw-Hill. 83 p.
- Çengel, Y.A. & Ghajar, A.J. (2015). *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*. McGraw-Hill Education. 968 p.
- Chanaanaoui, M., Vaudreuil, S. & Bounahmidi, T. (2016). Benchmark of concentrating solar power plants: historical, current and future technical and economic development. *Procedia Computer Science*. Vol. 83. pp. 782–789.
- Faizal, M., Saidur, R., Mekhilef, S. & Alin, M.A. (2013). Energy, economic and environmental analysis of metal oxides nanofluid for flat-plate solar collector. *Energy Conversion and Management*. Vol. 76. pp. 162–168.
- Fernández-García, A., Zarza, E., Valenzuela, L. & Perez, M. (2010). Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 14. pp. 1695–1721.
- Forman, P., Müller, S., Ahrens, M.A., Schnell, J., Mark, P., Höffer, R., Hennecke, K. & Krüger, J. (2015). Light concrete shells for parabolic trough collectors – Conceptual design, prototype and proof of accuracy. *Solar Energy*. Vol. 111. pp. 364–377.

Kalogirou, S.A. (2012). A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver. *Energy*. Vol. 48. pp. 298–306.

Kalogirou, S.A. (2014). *Solar energy engineering*. Academic Press. 840 p.

Killian, A.V. & Ebrary, I. (2009). *Solar collectors: energy conservation, design, and applications*. Nova Science Publishers. 349 p.

Kim, Y., Han, G. & Seo, T. (2008). An evaluation on thermal performance of CPC solar collector. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Vol. 35. pp. 446–457.

Malali, P.D., Chaturvedi, S.K. & Abdel-Salam, T. (2017). Performance optimization of a regenerative Brayton heat engine coupled with a parabolic dish solar collector. *Energy Conversion and Management*. Vol. 143. pp. 85–95.

Shafieian, A., Khiadani, M. & Nosrati, A. (2018). A review of latest developments, progress, and applications of heat pipe solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 95. pp. 273–304.

Sopian, K., Supranto, Daud, W.R.W., Othman, M.Y. & Yatim, B. (1999). Thermal performance of the double-pass solar collector with and without porous media. *Renewable Energy*. Vol. 18. pp. 557–564.

Tian, Y. & Zhao, C.Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*. Vol. 104. pp. 538–553.

Wang, K., He, Y. & Zhu, H. (2017). Integration between supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycles and molten salt solar power towers: A review and a comprehensive comparison of different cycle layouts. *Applied Energy*. Vol. 195. pp. 819–836.

Zhu, J. & Chen, Z. (2018). Optical design of compact linear fresnel reflector systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol. 176. pp. 239–250.

## LIITE A: LÄHTÖTIEDOT LUVUN 4 LASKUIHIN

Vastaanottimen emissiviteetti $\varepsilon_i$ (Taulukko 1)	0,14
Lasikuoren emissiviteetti $\varepsilon_o$ (Çengel & Ghajar 2015, s. 789)	0,9
Vastaanottimen ulkohalkaisija $D_i$ (m) (Taulukko 1)	0,070
Lasikuoren sisähalkaisija $D_o$ (m)	0,100
Lasikuoren ulkohalkaisija $D_s$ (m)	0,102
Stefanin-Bolzmännin vakio $\sigma$ (W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ) (Çengel & Ghajar 2015, s. 556)	5,67·10 <sup>-8</sup>
Lasikuoren lämmönjohtavuus $k_o$ (W/mK) (Çengel & Ghajar 2015, s. 919)	0,7
Ilmalle kun välitilassa paine (Çengel & Ghajar 2015, s. 926):	
Lämmönjohtavuus välitilassa $k_{i1}$ (W/mK)	0,04104
Prandtlin luku välitilassa $Pr_{i1}$	0,6946
Kinemaattinen viskositeetti välitilassa $\nu_{i1}$ (m <sup>2</sup> /s)	4,091·10 <sup>-5</sup>
Lämmönjohtavuus ympäristössä $k_{\infty 1}$ (W/mK)	0,02808
Prandtlin luku ympäristössä $Pr_{\infty 1}$	0,7202
Kinemaattinen viskositeetti ympäristössä $\nu_{\infty 1}$ (m <sup>2</sup> /s)	1,896·10 <sup>-5</sup>
Ilmalle kun välitilassa tyhjiö (Çengel & Ghajar 2015, s. 926):	
Lämmönjohtavuus ympäristössä $k_{\infty 2}$ (W/mK)	0,02735
Prandtlin luku ympäristössä $Pr_{\infty 2}$	0,7228
Kinemaattinen viskositeetti ympäristössä $\nu_{\infty 2}$ (m <sup>2</sup> /s)	1,798·10 <sup>-5</sup>
Ulkoilman lämpötila $T_{\infty}$ (K)	293,15
Vastaanottimen lämpötila $T_i$ (K)	673,15
Taivaan lämpötila $T_{sky}$ (K) (Kalogirou 2012)	265,15
Tuulen nopeus ympäristössä $V$ (m/s)	1
Putoamiskiihtyvyys $g$ (m/s <sup>2</sup> ) (Çengel & Ghajar 2015, s. 929)	9,81